GS. TSKH. NGUYỄN THIỆN PHÚC

Robot CÔNG NGHIỆP





NHÀ XUẤT BẢN KHOA HỌC VÀ KỸ THUẬT

GS. TSKH. NGUYỄN THIỆN PHÚC

ROBOT CÔNG NGHIỆP

(Giáo trình dùng cho sinh viên các trường kỹ thuật)

In lần thứ ba, có sửa chữa

NHÀ XUẤT BẢN KHOA HỌC VÀ KỸ THUẬT

HÀ NỘI - 2006

LỜI NÓI ĐẦU

Trong sự nghiệp công nghiệp hoá, hiện đại hoá đất nước vấn đề tự động hoá sản xuất có vai trò đặc biệt quan trọng.

Mục tiêu ứng dụng kỹ thuật robot trong công nghiệp là nhằm nâng cao năng suất dây chuyền công nghệ, nâng cao chất lượng và khả năng cạnh tranh của sản phẩm, đồng thời cải thiện điều kiện lao động. Sự cạnh tranh hàng hoá đặt ra một vấn đề thời sự là làm sao để hệ thống tự động hoá sản xuất phải có tính linh hoạt cao nhằm đáp ứng với sự biến động thường xuyên của thị trường hàng hoá cạnh tranh. Robot công nghiệp là bộ phận cấu thành không thể thiếu trong việc tạo ra những hệ thống tự động sản xuất linh hoạt đó.

Gần nửa thế kỷ có mặt trong sản xuất, robot công nghiệp đã có một lịch sử phát triển hấp dẫn. Ngày nay robot công nghiệp được dùng rộng rãi ở nhiều lĩnh vực sản xuất. Điều đó xuất phát từ những ưu điểm cơ bản của các loại robot đã được chọn lựa và đúc kết lại qua bao nhiêu năm ứng dụng ở nhiều nước.

Ở giai đoạn trước những năm 1990 hầu như trong nước ta hoàn toàn chưa du nhập về kỹ thuật robot, thậm chí còn chưa nhận được nhiều thông tin kỹ thuật về lĩnh vực này. Từ năm 1990 nhiều cơ sở công nghiệp đã bắt đầu nhập ngoại nhiều loại robot phục vụ các việc như tháo lắp dụng cụ cho các trung tâm gia công CNC, lắp ráp các linh kiện điện tử, thao tác ở các máy ép nhựa, hàn vỏ xe ôtô, xe máy và phun phủ bề mặt v.v... Có những nơi đã bắt đầu thiết kế, chế tạo và lắp ráp robot.

Ở nhiều trường đại học, cao đẳng và dạy nghề kỹ thuật cao đã bắt đầu giảng dạy về robot công nghiệp. Đặt biệt trong những năm gần đây nhiều nơi đã mở ngành đào tạo về cơ-tin-điện tử (Mechatronics) và rất quan tâm đến robot công nghiệp. "Cơ - tin - điện tử" và "Robot công nghiệp" là 2 lĩnh vực khoa học kỹ thuật cao rất gắn bó với nhau. Ở nhiều nước chúng kết hợp với nhau trong một ngành đào tạo. Trong "Robot công nghiệp" có hầu hết các vấn đề của "Cơ - tin - điện tử" và đồng thời sự phát triển của "Cơ - tin - điện tử" cũng đều phản ánh trong kỹ thuật robot.

Cuốn sách này là giáo trình giảng dạy về robot công nghiệp tại trường Đại học Bách khoa (ĐHBK) - Hà Nội. Trong đó sẽ cung cấp tương đối toàn diện các kiến thức cơ sở và nâng cao về robot công

nghiệp. Phần kiến thức cơ sở chúng tôi đã cố gắng viết dễ hiểu cho nhiều đối tượng bạn đọc. Đồng thời cũng bổ sung, cập nhật và phân tích nhiều thông tin, kết quả nghiên cứu hiện đại ở trong và ngoài nước. Sách được dùng làm tài liệu giảng dạy học tập cho giáo viên, sinh viên các trường đại học, cao đẳng và dạy nghề kỹ thuật cao. Đồng thời cũng là tài liệu tham khảo cho cán bộ nghiên cứu về lĩnh vực này và các cán bộ điều hành sản xuất ở nhiều ngành công nghiệp khác nhau. Trong lần in thứ hai chúng tôi bổ sung một số hình ảnh về các robocar được chế tạo trong nước vào cuối chương I và thêm một chương mới "Động học robot khi di chuyển nhỏ".

Trong lần in thứ ba này chúng tôi chỉ chỉnh sửa nhỏ ở một số chỗ.

Chúng tôi rất mong và cảm ơn sự đóng góp ý kiến của bạn đọc. Các ý kiến xin gửi về Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật, 70 Trần Hưng Đạo - Hà Nội.

Tác giả

CHƯƠNG I

GIỚI THIỆU CHUNG VỀ ROBOT CÔNG NGHIỆP

1.1. SỰ RA ĐỜI CỦA ROBOT CÔNG NGHIỆP.

Nhu cầu nâng cao năng suất và chất lượng sản phẩm ngày càng đòi hỏi ứng dụng rộng rãi các phương tiện tự động hoá sản xuất. Xu hướng tạo ra những dây chuyền về thiết bị tự động có tính linh hoạt cao đang hình thành. Các thiết bị này đang thay thế dần các máy tự động "cứng" chỉ đáp ứng một việc nhất định trong lúc thị trường luôn luôn đòi hỏi thay đổi mặt hàng về chủng loại, về kích cỡ và về tính năng v.v.... Vì thế ngày càng tăng nhanh nhu cầu ứng dụng robot để tạo ra các hệ thống sản xuất tự động linh hoạt.

Thuật ngữ "robot" lần đầu tiên xuất hiện năm 1922 trong tác phẩm "Rossum's Universal Robot" của Karel Capek. Theo tiếng Séc thì robot là người làm tạp dịch. Trong tác phẩm này nhân vật Rossum và con trai của ông đã tạo ra những chiếc máy gần giống như con người để hầu hạ con người.

Hơn 20 năm sau, ước mơ viễn tưởng của Kerel Capek đã bắt đầu hiện thực. Ngay sau chiến tranh thế giới lần thứ 2, ở Hoa Kì đã xuất hiện những tay máy chép hình điều khiển từ xa trong các phòng thí nghiệm về vật liệu phóng xạ.

Vào giữa những năm 50 bên cạnh các tay máy chép hình cơ khí đó, đã xuất hiện các loại tay máy chép hình thuỷ lực và điện từ, như tay máy Minotaur I hoặc tay máy Handyman của General Electric. Năm 1954 George C. Devol đã thiết kế một thiết bị có tên là "Cơ cấu bản lề dùng để chuyển hàng theo chương trình". Đến năm 1956 Devol cùng với Joseph F. Engelber, một kĩ sư trẻ của công nghiệp hàng không, đã tạo ra loại robot công nghiệp đầu tiên năm 1959 ở Công ty Unimation. Chỉ đến năm 1975 Công ty Unimation mới bắt đầu có lợi nhuận từ sản phẩm robot đầu tiên này.

Chiếc robot công nghiệp được đưa vào ứng dụng đầu tiên, năm 1961, ở một nhà máy ô tô của General Motors tại Trenton, New Jersey Hoa Kỳ.

Năm 1967 Nhật Bản mới nhập chiếc robot công nghiệp đầu tiên từ Công ty AMF của Hoa Kỳ (American Machine and Foundry Company).

Đến năm 1990 có hơn 40 công ty Nhật Bản, trong đó có những công ty khổng lồ như Công ty Hitachi và Công ty Mitsubishi, đã đưa ra thị trường quốc tế nhiều loại robot nổi tiếng.

Từ những năm 70 việc nghiên cứu nâng cao tính năng của robot đã chú ý nhiều đến sự lắp đặt thêm các cảm biến ngoại tín hiệu để nhận biết môi trường làm việc. Tại trường Đại học Tổng hợp Stanford người ta đã tạo ra loại robot lắp ráp tự động điều khiển bằng máy vi tính trên cơ sở xử lý thông tin từ các cảm biến lực và thị giác. Vào thời gian này Công ty IBM đã chế tạo loại robot có các cảm biến xúc giác và cảm biến lực, điều khiển bằng máy tính để lắp ráp các máy in gồm 20 cụm chi tiết.

Vào giai đoạn này ở nhiều nước khác cũng tiến hành các công trình nghiên cứu tương tự, tạo ra các loại robot điều khiển bằng máy vi tính, có lắp đặt các thiết bị cảm biến và thiết bị giao tiếp người - máy.

Một lĩnh vực được nhiều phòng thí nghiệm quan tâm là robot tự hành. Các công trình nghiên cứu tạo ra robot tự hành theo hướng bắt chước chân người hoặc súc vật. Các robot này còn chưa có nhiều ứng dụng trong công nghiệp. Tuy nhiên các loại xe robot (robocar) lại nhanh chóng được đưa vào hoạt động trong các hệ thống sản xuất tự động linh hoạt.

Từ những năm 80, nhất là vào những năm 90, do áp dụng rộng rãi các tiến bộ kỹ thuật về vi xử lý và công nghệ thông tin, số lượng robot công nghiệp đã gia tăng, giá thành đã giảm đi rõ rệt, tính năng đã có nhiều bước tiến vượt bậc. Nhờ vậy robot công nghiệp đã có vị trí quan trọng trong các dây chuyền tự động sản xuất hiện đại.

Ngày nay chuyên ngành khoa học về robot "robotics" đã trở thành một lĩnh vực rộng trong khoa học, bao gồm các vấn đề cấu trúc cơ cấu động học, động lực học, lập trình quỹ đạo, cảm biến tín hiệu, điều khiển chuyển động v.v... Các vấn đề này sẽ lần lượt được đề cập đến trong các chương của giáo trình này.

Trước khi bước vào nghiên cứu các nội dung này chúng ta cũng cần thống nhất về thuật ngữ "robot công nghiệp" (Industrial robot). Trong nhiều tài liệu khác nhau, định nghĩa về robot công nghiệp cũng khác nhau. Khi "robot công nghiệp" đầu tiên ra đời, Công ty AMF đã quảng cáo nó là một loại máy tự động vạn năng. Trong Từ điển Webster định nghĩa robot là những máy tự động có thể thực hiện được một số chức năng của con người. Nhưng nếu vậy thì có nhiều loại máy khác nhau cũng có thể gọi là robot. Viện Kỹ thuật robot của Hoa Kì định nghĩa

robot là loại tay máy nhiều chức năng, với chương trình làm việc thay đổi được, dùng để thực hiện một số thao tác sản xuất. Có nhiều tài liệu khi định nghĩa robot rất lưu ý đến tiêu chí điều khiển bằng máy tính. Nhưng trong phân loại robot công nghiệp theo tiêu chuẩn của Nhật Bản (JIS B 0134 - 1979) có cả nhóm tay máy điều khiển bằng tay.

Theo ISO (International Standards Organization) thì: "robot công nghiệp là một tay máy đa mục tiêu, có một số bậc tự do, dễ dàng lập trình, điều khiển trợ động, dùng để tháo lắp phôi, dụng cụ hoặc các vật dụng khác. Do chương trình thao tác có thể thay đổi nên thực hiện nhiều nhiệm vụ đa dạng". Tuy nhiên, robot công nghiệp được định nghĩa như thế chưa hoàn toàn thoả đáng.

Robot công nghiệp có thể được hiểu là những thiết bị tự động linh hoạt, bắt chước được các chức năng lao động công nghiệp của con người. Nói đến thiết bị tự động linh hoạt là nhấn mạnh đến khả năng thao tác với nhiều bậc tự do, được điều khiển trợ động và lập trình thay đổi được. Còn nói đến sự bắt chước các chức năng lao động công nghiệp của con người là có ý nói đến sự không hạn chế từ các chức năng lao động chân tay đơn giản đến trí khôn nhân tạo, tùy theo loại hình công việc lao động cần đến chức năng đó hay không. Đồng thời cũng nói đến mức độ cần thiết bắt chước được như con người hay không.

1.2 TÌNH HÌNH PHÁT TRIỂN ROBOT CÔNG NGHIỆP.

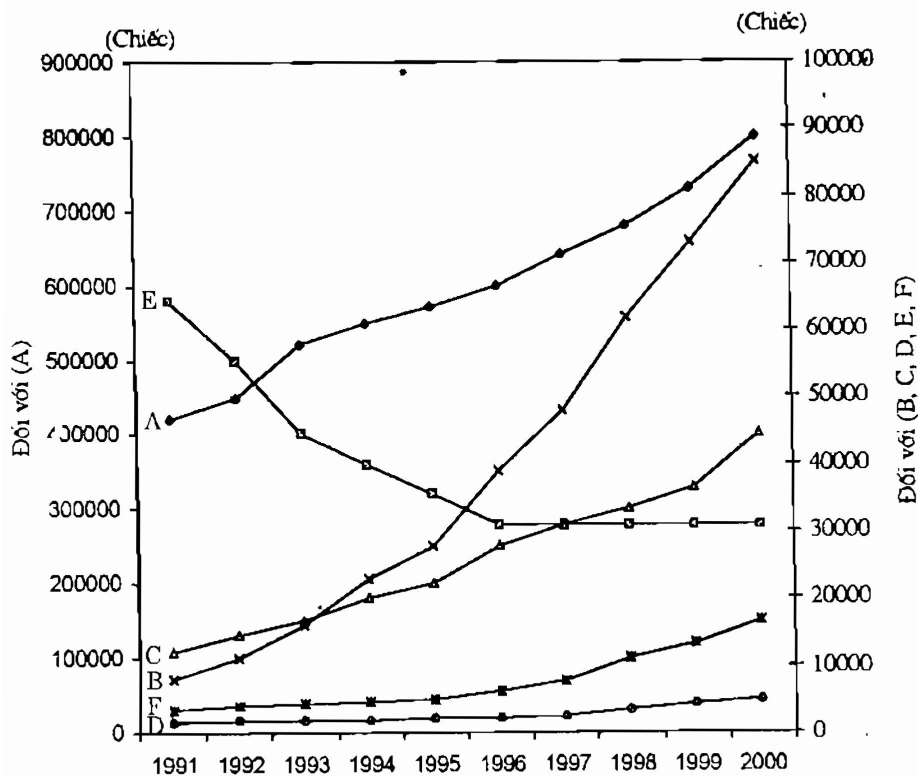
Gần nửa thế kỷ có mặt trong sản xuất, robot công nghiệp đã có một lịch sử phát triển hấp dẫn. Ngày nay đã có nhiều tài liệu phổ thông viết về tổng quan qúa trình phát triển này. Vì thế ở đây chỉ nêu tóm tắt một số liệu minh họa bằng các biểu đồ về tình hình phát triển của robot công nghiệp.

Trên hình 1.1. là biểu đồ về tình hình ứng dụng robot công nghiệp ở các nước.

Trên hình 1.2 là biểu đồ về chỉ số sử dụng robot ở các nước và ở trong ngành công nghiệp ô tô, biểu thị qua số lượng robot trên 1 vạn công nhân.

Hình 1.3 là biểu đồ về thị trường robot năm 2001.

Các số liệu ở các biểu đồ lấy theo các tài liệu của Liên đoàn quốc tế về robot (International Federation of Robotics).



Hình 1.1. *Tình hình ứng dụng robot công nghiệp ở các nước*

(A) Các nước: Pháp, Đức, Italia, Nhật, Anh, Mỹ

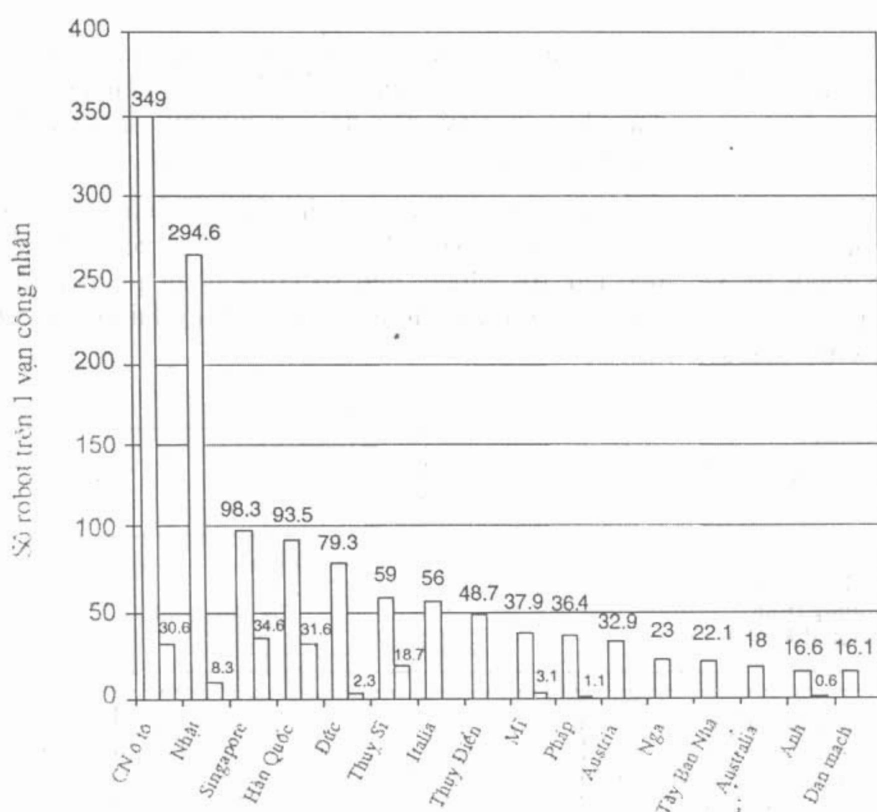
(B) Châu á: úc, Hàn Quốc, Singapore, Đài Loan

(C) Tây Âu: Áo, Đan Mạch, Phần Lan, Nauy, Tây Ban Nha, Thuỵ Điển, Thuỵ Sĩ

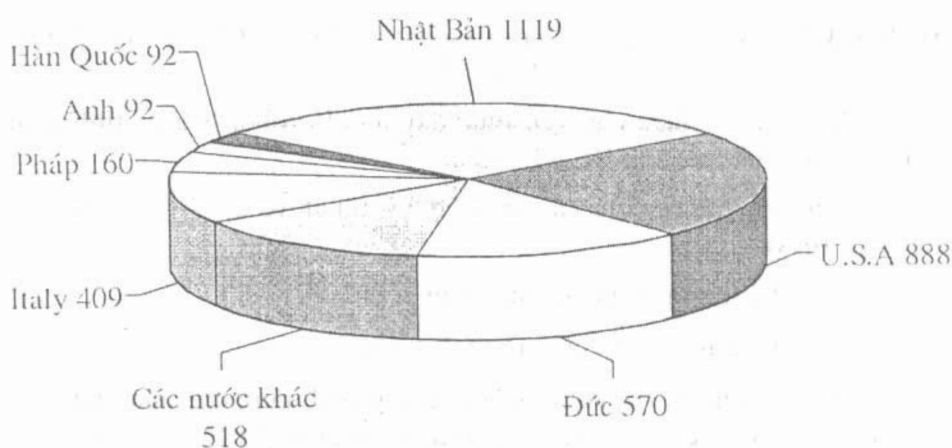
(D) Đông Âu: Séc, Hungari, Ba Lan, Slovakia, Slovenia

(E) Các nước SNG

(F) Các nước khác.



Hình 1.2 - *Biểu đồ về chỉ số sử dụng robot (số lượng robot trên 1 vạn công nhân ở mỗi nước)*



Hình 1.3. *Thị trường robot năm 2001*

Về hiệu quả sử dụng robot thì ở đây chỉ đưa ra một vài ví dụ ở hai nhà máy thuộc Tập đoàn Chế tạo máy Fuji của Nhật Bản.

Hình 1.4 minh họa các số liệu thống kê: nếu dùng máy công cụ thông thường thì mỗi công nhân đứng 1 máy; với máy điều khiển chương trình thì một công nhân đứng 2 máy; còn đối với modun sản xuất linh hoạt dùng robot thì một công nhân có thể trông coi 10 modun.

Số liệu sau đây của Tập đoàn Fuji đã minh họa về ảnh hưởng của việc ứng dụng robot ở nhà máy sản xuất động cơ. Do tăng cường trang bị thêm robot từ 32 chiếc lên 101 chiếc, nên số công nhân giảm từ 108 xuống còn 60 người, nhưng sản lượng động cơ hàng tháng lại tăng lên từ 6000 chiếc lên đến 10.000 chiếc.

Máy thông thường (1 công nhân-1máy)

Máy điều khiển chương trình (1 công nhân-2máy)

Modun sản xuất linh hoạt (1 công nhân-10 modun)

Hình 1.4. *Mô phỏng hiệu quả sử dụng robot ở Nhà máy Chế tạo robot Fuji (Nhật Bản).*

Các nguyên nhân chủ yếu thúc đẩy tốc độ robot hoá và linh hoạt hệ thống sản xuất hiện đại là:

- Sự ảnh hưởng của các tiến bộ kỹ thuật về cơ - tin - điện tử (mechatronics).

- Tốc độ giảm giá nhanh của hàng vi điện tử.

- Tốc độ tăng chi phí cho người lao động.

Mức chi phí cho người lao động trung bình tăng 6% hàng năm so với mức giảm giá các máy tính logic trung bình giảm 25% hàng năm.

1.3. ỨNG DỤNG ROBOT CÔNG NGHIỆP.

1.3.1 Mục tiêu ứng dụng robot công nghiệp.

Mục tiêu ứng dụng robot công nghiệp nhằm góp phần nâng cao năng suất dây chuyền công nghệ, giảm giá thành, nâng cao chất lượng và khả năng cạnh tranh của sản phẩm, đồng thời cải thiện điều kiện lao động. Điều đó xuất phát từ những ưu điểm cơ bản của robot, đã đúc kết lại qua bao nhiêu năm được ứng dụng ở nhiều nước. Những ưu điểm co ban đó là:

1). Robot có thể thực hiện được một quy trình thao tác hợp lý bằng hoặc hơn người thợ lành nghề một cách ổn định trong suốt thời gian làm việc. Vì thế robot có thể góp phần nâng cao chất lượng và khả năng cạnh tranh của sản phẩm. Hơn thế, robot còn có thể nhanh chóng thay đổi công việc để thích nghi với sự biến đổi mẫu mã, kích cỡ sản phẩm theo yêu cầu của thị trường cạnh tranh.

2) Khả năng giảm giá thành sản phẩm do ứng dụng robot là vì giảm được đáng kể chi phí cho người lao động, nhất là ở các nước có mức cao về tiền lương lao động, cộng các khoản phụ cấp và bảo hiểm xã hội. Theo số liệu của Nhật Bản thì nếu 1 robot làm việc thay thế cho một người thợ thì tiền mua robot chỉ bằng tiền chi phí cho người thợ trong vòng 3 đến 5 năm, tuỳ theo robot làm việc mấy ca. Còn ở Hoa Kì, trung bình trong 1 giờ làm việc robot có thể đem lại tiền lời là 13USD. Ở nước ta những năm gần đây ở nhiều doanh nghiệp, khoản chi phí lương bổng cũng chiếm tỷ lệ cao trong giá thành sản phẩm

3) Việc áp dụng robot có thể làm tăng năng suất dây chuyền công nghệ. Sở dĩ như vậy vì nếu tăng nhịp độ khẩn trương của dây chuyền sản xuất, nếu không thay thế con người bằng robot thì người thợ không thể theo kịp hoặc rất chóng mệt mỏi. Theo số liệu của Hãng Fanuc, Nhật Bản, thì năng suất có khi tăng lên đến 3 lần.

4) Ứng dụng robot có thể cải thiện điều kiện lao động. Đó là ưu điểm nổi bật nhất mà chúng ta cần lưu tâm. Trong thực tế sản xuất có rất nhiều nơi người lao động phải làm việc suốt buổi trong môi trường rất bụi bặm, ẩm ướt, nóng nực hoặc ồn ào quá mức cho phép nhiều lần. Thậm chí ở nhiều nơi người lao động còn phải làm việc với môi trường độc hại nguy hiểm đến sức khoẻ con người, dễ bị cụt chân tay, dễ bị nhiễm hoá chất độc hại, nhiễm sóng điện từ và phóng xạ v.v...

1.3.2 Các bước ứng dụng robot.

Việc ưu tiên đầu tư trước hết phải nhằm để đồng bộ hoá cả hệ thống thiết bị, rồi tự động hoá và robot hoá chúng khi cần thiết. Để quyết

định đầu tư cho việc robot hoá cho cả dây chuyền công nghệ hoặc chỉ ở một vài công đoạn, người ta thường xem xét các mặt sau:

1) Nghiên cứu quá trình công nghệ được robot hoá và phân tích toàn bộ hệ thống sản xuất của xí nghiệp.

Trong bước này cần xét đến đầy đủ các chi phí và nếu hiệu quả tính ra cho toàn bộ hệ thống không thể hiện rõ thì việc đầu tư robot hoá là chưa nên.

2) Xác định các đối tượng cần robot hoá.

Khi xác định nên thay thế robot ở những nguyên công nào thì phải xem xét khả năng liệu robot có thay thế được không và có hiệu quả hơn không. Thông thường người ta ưu tiên ở những chỗ làm việc quá nặng nhọc, bụi bặm, ồn ào, độc hại, căng thẳng hoặc quá đơn điệu. Xu hướng thay thế hoàn toàn bằng robot thực tế không hiệu quả bằng việc giữ lại một số công đoạn mà đòi hỏi sự khéo léo của con người.

3) Xây dựng mô hình quá trình sản xuất đã được robot hóa.

Sau khi xác định được sơ đồ tổng thể quá trình công nghệ, cần xác định rõ dòng chuyển dịch nguyên liệu và dòng thành phẩm để đảm bảo sự nhịp nhàng đồng bộ của toàn hệ thống. Có thế mới phát huy được hiệu quả đầu tư vốn.

4) Chọn lựa mẫu robot thích hợp hoặc chế tạo robot chuyên dùng.
Đây là bước quan trọng, vì robot có rất nhiều loại với giá tiền rất khác nhau, nếu không chọn đúng thì có thể không những đầu tư quá đắt mà còn không phát huy được, như kiểu dùng người không đúng chỗ, việc này thường xảy ra khi mua robot của nước ngoài. Có những chức năng của robot được trang bị nhưng không cần dùng cho công việc cụ thể mà nó đảm nhiệm trên dây chuyền sản xuất. Vì thế mà đội giá lên rất cao, chỉ có lợi cho nơi cung cấp thiết bị.

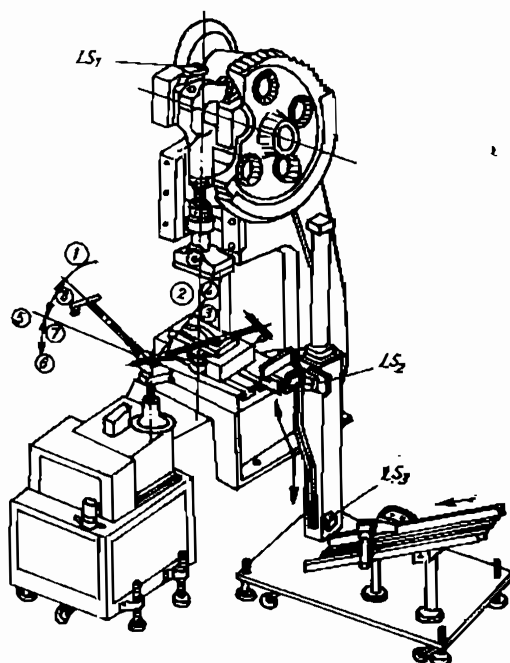
Cấu trúc robot hợp lí nhất là cấu trúc theo modun hoá. Như thế có thể hạ giá thành sản xuất, đồng thời đáp ứng được nhu cầu phục vụ công việc đa dạng. Cấu trúc càng đơn giản càng dễ thực hiện độ chính xác cao và hạ giá thành. Ngoài ra lại còn có tự tạo dựng các robot thích hợp với công việc trên cơ sở mua lắp các modun chuẩn hoá. Đó là hướng triển khai hợp lí đối với đại bộ phận xí nghiệp trong nước hiện nay cũng như trong tương lai.

1.3.3 Các lĩnh vực ứng dụng robot công nghiệp.

1) Một trong các lĩnh vực đó là kĩ nghệ đúc. Thường trong phân xưởng đúc công việc rất đa dạng, điều kiện làm việc nóng bức, bụi bặm, mặt hàng thay đổi luôn và chất lượng vật đúc phụ thuộc nhiều vào quá

trình thao tác. Việc tự động hoá toàn phần hoặc từng phần quá trình đúc bằng các dây chuyền tự động thông thường với các máy tự động chuyên dụng đòi hỏi phải có các thiết bị phức tạp, đầu tư khá lớn. Ngày nay ở nhiều nước trên thế giới robot được dùng rộng rãi để tự động hoá công nghệ đúc, nhưng chủ yếu là để phục vụ các máy đúc áp lực.Robot có thể làm nhiều việc như rót kim loại nóng chảy vào khuôn, lấy vật đúc ra khỏi khuôn, cắt mép thừa, làm sạch vật đúc hoặc làm tăng bền vật đúc bằng cách phun cát v.v... Dùng robot phục vụ các máy đúc áp lực có nhiều ưu điểm. Ví dụ, đảm bảo ổn định chế độ làm việc; chuẩn hoá về thời gian thao tác, về nhiệt độ và điều kiện tháo vật đúc ra khỏi khuôn ép. Bởi thế, chất lượng vật đúc tăng lên.

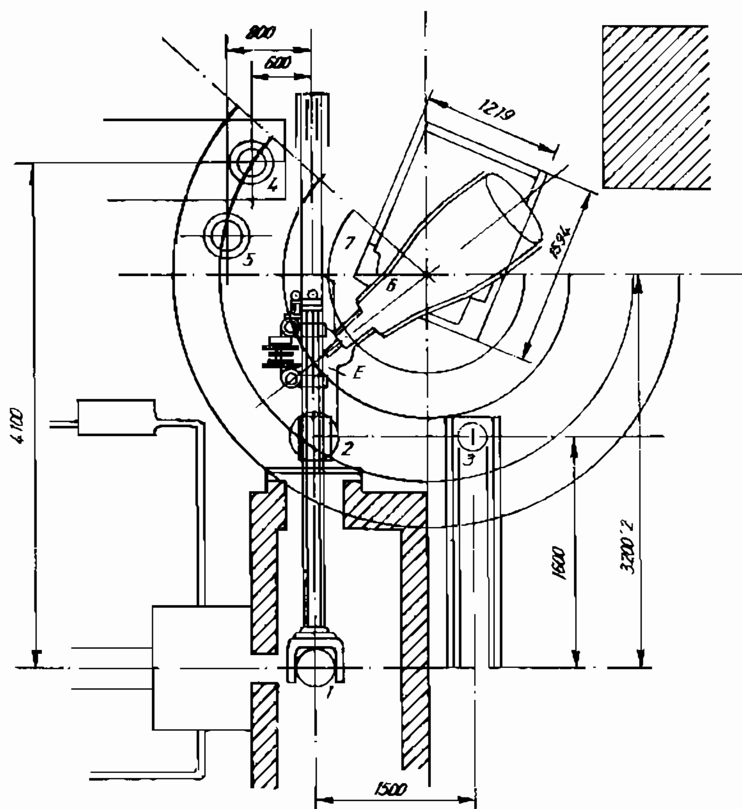
2) Trong ngành gia công áp lực điều kiện làm việc cũng khá nặng nề, dễ gây mệt mỏi nhất là ở trong các phân xưởng rèn đập nên đòi hỏi sớm áp dụng robot công nghiệp. Trong phân xưởng rèn robot có thể thực hiện nhiều việc, ví dụ như đưa phôi thừa vào lò nung, lấy phôi đã nung nóng ra khỏi lò, mang nó đến máy rèn, chuyển lật phôi trong khi rèn và xếp lại vật đã rèn vào giá hoặc thùng v.v... Sử dụng các loại robot đơn giản nhất cũng có thể đưa năng suất tăng 1,5 ÷ 2 lần và hoàn toàn giảm nhẹ lao động của công nhân. So với các phương tiện cơ giới và tự động khác phục vụ các máy rèn dập thì dùng robot có ưu điểm là nhanh hơn, chính xác hơn và cơ động hơn.



Hình 1.5. *Sơ đồ làm việc của robot RBM - 5 phục vụ máy đột dập cỡ nhỏ.*

Trên hình 1.5 là sơ đồ làm việc của robot từ vị trí (1) quay sang phải tới vị trí (2) rồi hạ xuống vị trí (3). Sau khi kẹp chi tiết tay máy nâng lên vị trí (4) rồi quay sang tới vị trí (5) và hạ xuống vị trí (6) để đặt chi tiết vào băng chuyền. Tay máy tiếp tục nâng lên tới vị trí (7) và quay sang vị trí xuất phát (8) chờ tín hiệu mở máy. Ở đây dùng các ngoại tín hiệu từ LS1, LS2, LS3 báo vị trí cao nhất của đầu trượt, vị trí trên và dưới của thiết bị nâng phôi.

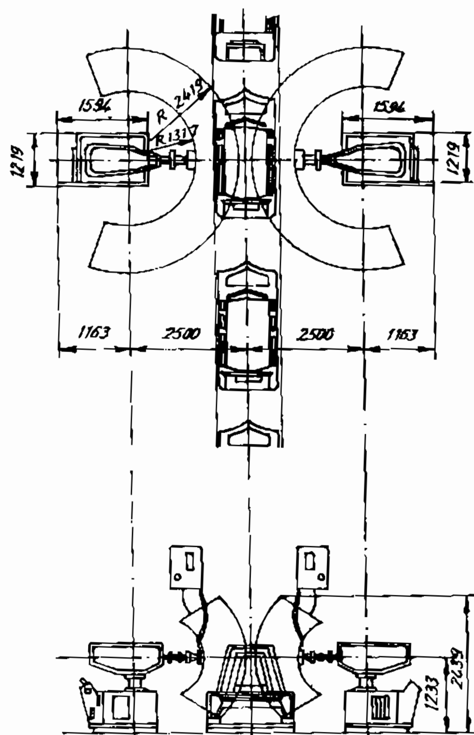
3) Các quá trình hàn và nhiệt luyện thường bao gồm nhiều công việc nặng nhọc, độc hại và ở nhiệt độ cao. Do vậy ở đây cũng nhanh chóng ứng dụng kĩ thuật robot công nghiệp.



Hình 1.6. *Sơ đồ bố trí robot phục vụ nhiệt luyện bánh răng.*

Trên hình 1.6 giới thiệu sơ đồ bố trí robot phục vụ việc nhiệt luyện bánh răng ở Công ty Kawasaki Nhật Bản. Bánh răng chiếm các vị trí sau đây trong quá trình nhiệt luyệt: 1 - vị trí trong lò; 2 - vị trí chờ vào lò nung; 3 - vị trí lấy từ băng chuyền; 4 - vị trí trên máy ép; 5 - vị trí trên băng chuyền khi đã nhiệt luyện xong. Tay máy (6) trong vùng hoạt động (7) ngoài việc vươn tới các vị trí kể trên còn điều khiển thiết bị phụ đưa chi tiết ra vào lò nung.

Robot được sử dụng phổ biến nhất là trong việc tự động hoá quá trình hàn, đặc biệt trong kỹ nghệ ôtô. Trên hình 1.7 là sơ đồ làm việc của robot trên dây chuyền hàn vỏ ôtô Toyota (Nhật Bản).

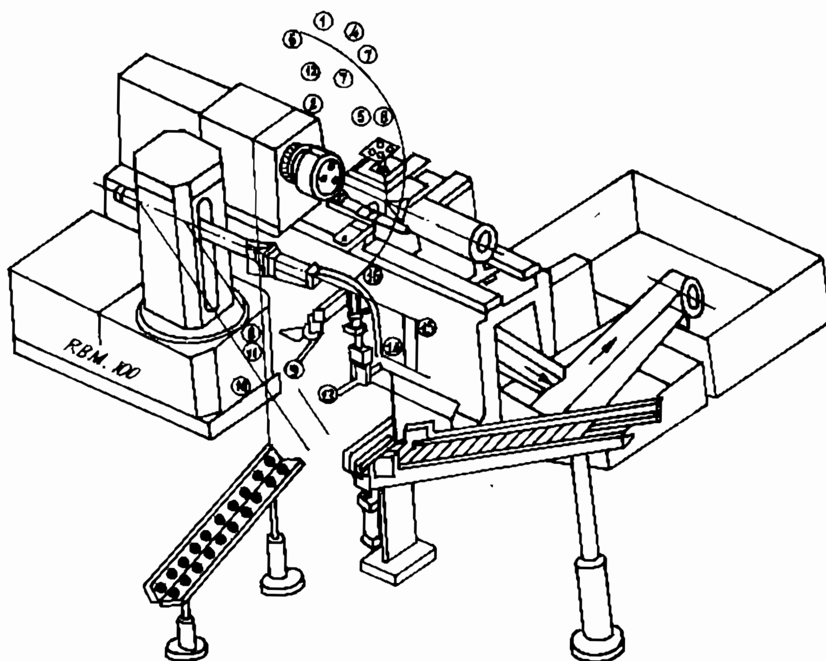


Hình 1.7. *Sơ đồ làm việc của robot trên dây chuyền hàn vỏ ô tô Toyota.*

Khi sử dụng robot trong việc hàn, đặc biệt là hàn hồ quang với mối hàn chạy theo đường cong không gian cần phải đảm bảo sao cho điều chỉnh được phương và khoảng cách của điện cực so với mặt phẳng của mối hàn. Nhiệm vụ đó cần được xem xét khi tổng hợp chuyển động của bàn kẹp và xây dựng hệ thống điều khiển có liên hệ phản hồi. Kinh nghiệm cho thấy rằng có thể thực hiện tốt công việc hàn nếu thông số chuyển động của đầu điện cực và chế độ hàn được điều khiển bằng một chương trình thống nhất, đồng thời nếu được trang bị các bộ phận cảm biến, kiểm tra và hiệu chỉnh. Ngoài ra robot hàn còn pháp huy tác dụng lớn khi hàn trong những môi trường đặc biệt.

4) Robot được dùng khá rộng rãi trong gia công và lắp ráp. Thường thường người ta sử dụng robot chủ yếu vào các việc tháo lắp phôi và sản phẩm cho các máy gia công bánh răng, máy khoan, máy tiện bán tự động v...v. Trên hình 1.8 là một ví dụ ứng dụng robot phục vụ máy tiện bán tự động gia công các trục bé. Robot RBM - 100 lần lượt lấy phôi đã được xếp thành dãy đưa vào mâm cặp chuyên dùng, kẹp chặt bằng thuỷ lực. Rồi sau khi gia công xong lại tháo chi tiết xếp vào băng chuyền. Trên tay máy lắp hai bàn kẹp, dùng cho phôi và dùng cho sản phẩm. Các con số trên hình vẽ chỉ các vị trí liên tiếp của tay máy. Dưới thân máy có băng tải thoát phoi.

Trong ngành chế tạo máy và dụng cụ đo chi phí về lắp ráp thường chiếm đến 40% giá thành sản phẩm. Trong lúc đó mức độ cơ khí hoá lắp ráp không quá $10 \div 15\%$ đối với sản phẩm hàng loạt và 40% đối với sản xuất hàng loạt lớn. Bởi vậy việc tạo ra và sử dụng robot lắp ráp có ý nghĩa rất quan trọng.

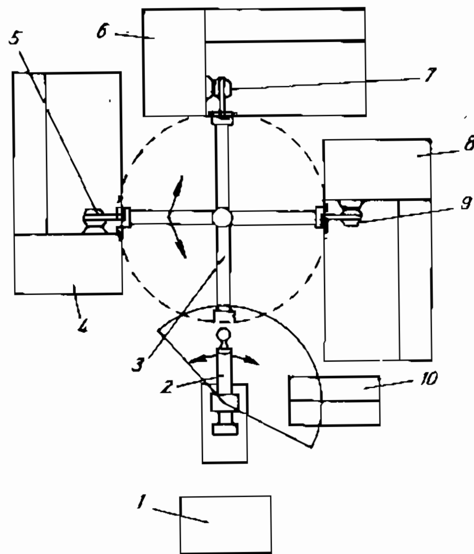


Hình 1.8. *Robot phục vụ máy tiện bán tự động.*

Phân tích quá trình lắp ráp chúng ta thấy rằng con người khi gá đặt các chi tiết để lắp chúng với nhau thì có thể làm nhanh hơn các thiết bị tự động, nhưng khi thực hiện các động tác khác trong quá trình ghép chặt chúng thì chậm hơn. Bởi vậy yếu tố thời gian và độ chính xác định vị là vấn đề quan trọng cần quan tâm nhất khi thiết kế các loại robot lắp ráp. Ngoài ra, yêu cầu hiện nay đối với các loại robot lắp ráp là nâng cao tính linh hoạt để đáp ứng nhiều loại công việc, hạ giá thành và dễ thích hợp với sản xuất loạt nhỏ.

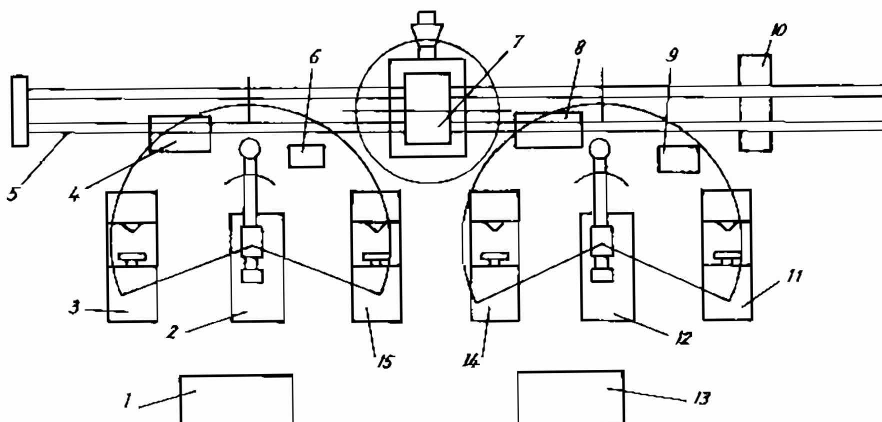
Ngày nay đã xuất hiện nhiều dây chuyền tự động gồm các máy vạn năng với robot công nghiệp. Các dây chuyền đó đạt mức độ tự động cao, tự động hoàn toàn không có con người trực tiếp tham gia, rất linh hoạt và không đòi hỏi đầu tư lớn. Ở đây các máy và robot trong dây chuyền được điều khiển bằng cùng một hệ thống chương trình.

Để mở rộng phạm vi và khả năng hoạt động của robot người ta còn dùng các thiết bị phân phối phụ. Trên hình 1.9 giới thiệu một loại cơ cấu phân phối (3) có dạng khung chữ thập xoay. Ở mỗi đầu nhánh của khung chữ thập được lắp một bàn kẹp để nhận phôi do robot (2) theo lệnh của bàn điều khiển (1) lấy từ ổ (10) đưa tới. Rồi các tay máy đơn giản (5, 7, 9) lần lượt đưa phôi từ bộ phận phân phối vào mâm cặp của các máy tiện bán tự động (4, 6, 8)Theo trình tự ngược lại các cơ cấu phụ và robot sẽ lần lượt đưa các chi tiết đã gia công xong ra ngoài.



Hình 1.9. *Cơ cấu phân phối phụ*

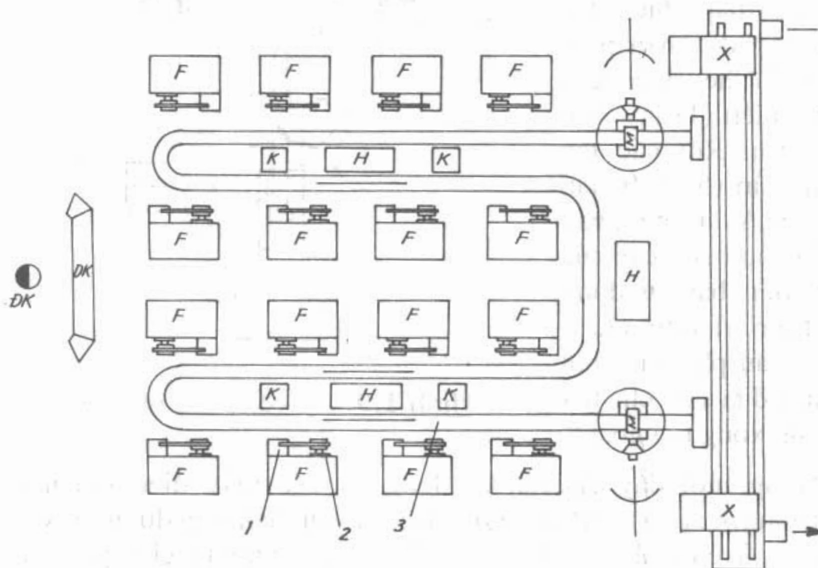
Trong một dây chuyền tự động có các máy điều khiển theo chương trình robot có thể đứng một chỗ, chuyển dịch trên đường ray hoặc treo di động. Trên hình 1.10 hai robot (2) và (12) đứng tại chỗ, phối hợp



Hình 1.10. *Sơ đồ bố trí robot phối hợp làm việc trên dây chuyền tự động.*

với robot (7) treo di động trên đường trượt (5) phục vụ bốn máy (3, 11, 14, 15) điều khiển theo chương trình. Ngoài ổ phôi (4), thùng đựng chi tiết (8) và (10) còn có bàn lật phôi (6) và (9).

Sử dụng robot treo di động, có thể đơn giản hoá dây chuyền tự động, nhất là khi gia công các chi tiết phức tạp. Một robot treo di động có thể phục vụ không phải bốn máy như trên hình 1.10 mà 10 ÷ 15 máy hoặc hơn nữa như trên hình 1.11.

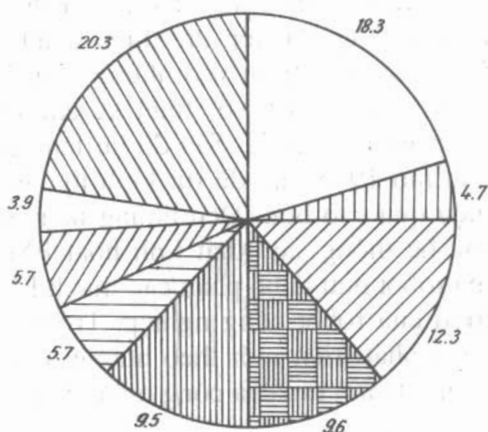


Hình 1.11. *Dây chuyền máy phay tự động có hai robot phục vụ*

Kỹ thuật robot có ưu điểm quan trọng nhất là tạo nên khả năng linh hoạt hoá sản xuất. Việc sử dụng máy tính điện tử, robot và máy điều khiển theo chương trình đã cho phép tìm được những phương thức mới mẻ để tạo nên các dây chuyền tự động cho sản xuất hàng loạt với nhiều mẫu, loại sản phẩm. Dây chuyền tự động "cứng" gồm nhiều thiết bị tự động chuyên dùng đòi hỏi vốn đầu tư lớn, nhiều thời gian để thiết kế và chế tạo trong lúc quy trình công nghệ luôn luôn cải tiến, nhu cầu đối với chất lượng và quy cách của sản phẩm luôn luôn thay đổi. Bởi vậy nhu cầu "mềm" hoá hay là linh hoạt hoá dây chuyền sản xuất ngày càng tăng. Kỹ thuật robot công nghiệp và máy vi tính đã đóng vai trò quan trọng trong việc tạo ra các dây chuyền tự động linh hoạt.

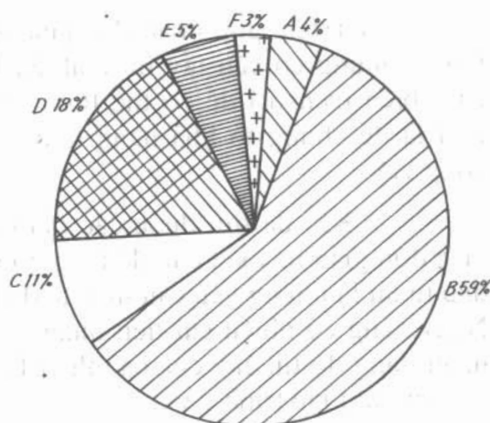
Xuất phát từ nhu cầu và khả năng linh hoạt hoá sản xuất, trong những năm gần đây không những chỉ các nhà khoa học mà cả các nhà sản xuất đã tập trung sự chú ý vào việc hình thành và áp dụng các hệ sản xuất tự động linh hoạt, gọi tắt là hệ sản xuất linh hoạt (SXLH). Trong các tài

liệu nước ngoài thường dùng các từ viết tắt theo tiếng Anh FMS (Flexible Manufacturing System) để diễn tả hệ sản xuất linh hoạt. Hệ SXLH ngày nay thường bao gồm các thiết bị gia công được điều khiển bằng chương trình số, các phương tiện vận chuyển và kho chứa trong phân xưởng đã được tự động hoá và nhóm robot công nghiệp ở các vị trí trực tiếp với các thiết bị gia công hoặc thực hiện các nguyên công phụ. Việc điều khiển và kiểm tra hoạt động toàn bộ hệ SXLH là rất thích hợp với quy mô sản xuất nhỏ và vừa, thích hợp với yêu cầu luôn luôn thay đổi chất lượng sản phẩm và quy trình công nghệ. Bởi vậy ngày này hệ SXLH thu hút sự chú ý không những ở các nước phát triển và ngay cả ở các nước đang phát triển. Trong một số tài liệu nước ngoài hệ FMS (Flexible Manufacturing System) này được diễn giải như hệ sản xuất của tương lai (Future Manufacturing System), sự trùng lặp các từ viết tắt này không phải ngẫu nhiên.



Hình 1.12. *Tỷ lệ phân bố về loại công việc được dùngrobot*

1. Đúc áp lực 18,3%
2. Hàn điểm 14,7%
3. Hàn hồ quang 12,3%
4. Cấp thoát phôi 9,6%
5. Lắp ráp 9,5%
6. Nghiên cứu / Đào tạo 5,7%
7. Phun phủ bề mặt 5,7%
8. Nâng chuyển, sắp xếp 3,9%
9. Các việc khác 20,3%



Hình 1.13. *Sơ đồ phân bố tỷ lệ các loại robot với các loại phương pháp điều khiển khác nhau.*

A - Tay máy điều khiển bằng tay 4%

B - Robot được điều khiển theo chu kỳ cứng 59%

C - Robot được điều khiển theo chu kỳ thay đổi theo chương trình 11%

D - Robot được điều khiển dùng chương trình dạy học 18%

E - Robot điều khiển theo theo chương trình số 5%

F - Robot được điều khiển có xử lý tinh khôn 3%

Trên hình 1.12 là các số liệu của Hiệp hội Robot nước Anh (BRA - British Robot Association) và biểu đồ tỷ lệ phân bố về các loại công việc được sử dụng robot. Còn hình 1.13 là biểu đồ phân bố tỷ lệ các loại robot sử dụng các phương pháp điều khiển khác nhau. Đây là kết quả khảo sát của Hiệp hội Robot công nghiệp Nhật Bản (JIRA - Japan Industrial Robot Assciation) năm 1981. Tuy chưa có các số liệu thống kê trong những năm gần đây nhưng chắc chắn bức tranh trên hình 1.13 đã thay đổi đi nhiều vì sự tác động của các tiến bộ kỹ thuật về cơ - tin - điện tử (mechatronics) và tốc độ giảm giá nhanh của thiết bị vi xử lý.

1.4. NỘI DUNG NGHIÊN CỨU PHÁT TRIỂN ROBOT CÔNG NGHIỆP.

1.4.1. Nhận xét về quá trình phát triển robot công nghiệp.

Ra đời từ những năm 50, robot công nghiệp đã có những bước phát triển quan trọng. Từ năm 1960 do sự xuất hiện máy vi tính, robot công nghiệp đã tiếp thu được thành tựu mới đó và ngày càng hấp dẫn. Cao trào phát triển vào những năm 70 và đánh dấu mốc bằng Hội nghị quốc tế lần thứ 6 về "thiết kế chế tạo và ứng dụng robot công nghiệp" Chicago năm 1972. Sau đó lại lắng dần xuống, nhất là sau khủng hoảng dầu mỏ 1975 như để rút kinh nghiệm áp dụng vào chỗ nào là phát huy hiệu quả cao hơn. Đến những năm 80 thì xuất hiện nhu cầu hình thành các hệ thống sản xuất linh hoạt FMS (Flexible Manufacturing System) mà robot như là bộ phận cấu thành FMS. Nhu cầu đó kích thích bước phát triển của robot công nghiệp. Trong năm 90 robot công nghiệp cũng có bước phát triển mới theo hướng đồng bộ hệ thống trên cơ sở vận dụng những thành tựu của công nghệ thông tin ứng dụng.

Bản thân phần kỹ thuật, robot công nghiệp cũng thể hiện các xu thế phát triển sau đây:

1) Trong giai đoạn đầu phát triển người ta rất quan tâm đến việc tạo ra những cơ cấu tay máy nhiều bậc tự do, được trang bị nhiều loại cảm biến (sensor) để có thể thực hiện được những công việc phức tạp, như là để chứng tỏ khả năng thay thế con người trong nhiều loại hình công việc.

2) Khi đã tìm được các địa chỉ ứng dụng trong công nghiệp, thì việc đơn giản hoá kết cấu để tăng độ chính xác định vị và giảm giá thành đầu tư lại là những yêu cầu thực tế đối với thị trường hàng hoá cạnh tranh. Ngày càng có nhiều cải tiến quan trọng trong kết cấu các bộ phận chấp hành, tăng độ tin cậy của các thiết bị điều khiển, tăng mức thuận tiện và dễ dàng khi lập trình v.v...

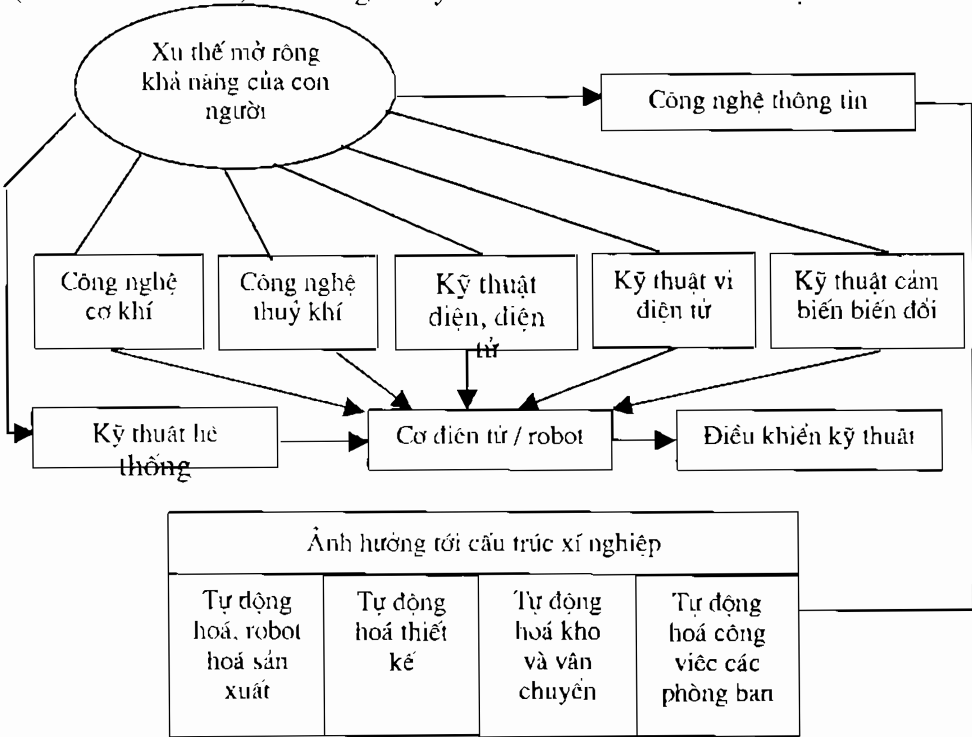
3) Để mở rộng phạm vi ứng dụng cho robot công nghiệp nhằm thay thế lao động nhiều loại hình công việc, ngày càng rõ nét về xu thế tăng cường khả năng nhận biết và xử lý tín hiệu từ môi trường làm việc. Các thành tựu khoa học và tiến bộ kỹ thuật laser, kỹ thuật tia hồng ngoại, kỹ thuật xử lý ảnh v.v... đã ngày càng hiện thực xu thế phát triển robot công nghiệp hướng vào việc thích nghi được với môi trường làm việc.

4) Cùng với các xu thế trên, robot công nghiệp luôn luôn được định hướng tăng cường năng lực xử lý công việc để trở thành các robot tinh khôn nhờ áp dụng các kết quả nghiên cứu về hệ điều khiển nơron và trí khôn nhân tạo v.v...

1.4.2. Cơ - tin - điện tử và robot công nghiệp.

Cơ - tin - điện tử và robot công nghiệp là 2 lĩnh vực khoa học kỹ thuật cao rất gắn bó với nhau. Ở một số nước chúng kết hợp với nhau như là một ngành học. Trong robot công nghiệp có hầu hết các vấn đề của cơ điện tử. Đồng thời sự phát triển của cơ điện tử cũng đều phản ánh trong kỹ thuật robot. Vì vậy để nghiên cứu về robot cần xem xét các vấn đề cơ - tin - điện tử.

Thuật ngữ "cơ - tin - điện tử" (mechatronics) thể hiện sự kết hợp giữa cơ học máy với công nghệ thông tin vi điện tử học (microelectronics). Ý tưởng chủ yếu ban đầu của cơ - tin - điện tử là cài



Hình 1.14. *Sơ đồ quan hệ.*

đặt các thiết bị điều khiển vi điện tử vào các máy thông thường. Dần dần bản thân bên trong máy cũng thay đổi đi và chức năng của máy cũng được mở rộng thêm nhiều. Còn về thiết bị điện tử, chính xác hơn là vi điện tử, thì các tiến bộ mới cũng không ngừng được áp dụng, từ các mạch tích phân IC (Integrated Circuit), các bộ vi xử lý (Microprosessor), các bộ điều khiển lập trình được PLC (Programmable Logical Controller), các máy tính PC v...v.

Phần nối ghép thành hệ thống giữa các thiết bị điều khiển vi điện tử với các thiết bị chấp hành trong máy (có thể là thiết bị cơ, thiết bị thuỷ khí, thiết bị điện hoặc điện từ) chủ yếu là các bộ cảm biến (sensor), các bộ biến đổi (converter) và các thiết bị của công nghệ thông tin.

Sơ đồ trên hình 1.14 cho ta hình dung về các mối quan hệ và ảnh hưởng của cơ điện tử và robot đến cấu trúc của xí nghiệp công nghiệp.

1.4.3. Robot và hệ thống sản xuất linh hoạt.

Nhu cầu của thị trường cạnh tranh luôn luôn đòi hỏi các nhà sản xuất phải thay đổi mẫu mã, kích cỡ và thường xuyên cải tiến nâng cao chất lượng sản phẩm. Như vậy sự cạnh tranh hàng hoá đặt ra một vấn đề thời sự là phải có hệ thống thiết bị sản xuất thay đổi linh hoạt được để có thể đáp ứng với sự biến động thường xuyên của thị trường. Nhờ sự phát triển trong mấy chục năm gần đây của kỹ thuật số và công nghệ thông tin chúng ta mới có khả năng "mềm" hoá hệ thống thiết bị sản xuất. Trên cơ sở đó đã ra đời hệ thống sản xuất linh hoạt FMS là phương thức sản xuất hiện đại. Nó có ưu điểm cơ bản là các thiết bị chủ yếu của hệ thống chỉ đầu tư một lần, còn đáp ứng lại sự thay đổi sản phẩm bằng phần mềm máy tính điều khiển là chính. Hệ thống FMS rất hiện đại nhưng lại thích hợp với qui mô sản xuất vừa và nhỏ. Ngày nay ở các nước phát triển các hệ thống FMS có xu hướng thay thế dần các hệ thống thiết bị tự động "cứng" sản xuất hàng loạt lớn sản phẩm. Các hệ thống thiết bị tự động cứng này rất đắt tiền mà khi thay đổi về yêu cầu sản phẩm thì phải đổi mới gần như hoàn toàn. Như vậy, chúng nhanh chóng trở nên lạc hậu vì không thích nghi được với thị trường đầy biến động.

Ý tưởng chủ đạo trong việc tổ chức hệ thống sản xuất hiện đại linh hoạt là "linh hoạt hoá" và "môđun hoá". Một hệ thống sản xuất linh hoạt có thể gồm nhiều môđun linh hoạt. Một trong những hệ thống như vậy là hệ thống CIM (Computer Integrated Manufacturing) - hệ thống tích hợp sản xuất dùng máy tính.

Để tạo ra những môđun sản xuất linh hoạt đó cần có mặt robot như một bộ phận cấu thành. Ở đây, robot làm những công việc chuyển tiếp giữa các máy công tác (ví dụ, cấp thoát phôi và dụng cụ cho các

trung tâm gia công), vận chuyển trong phân xưởng, thao tác trong kho tự động v.v...

Bản thân cơ cấu tay máy của robot cũng là một cơ cấu linh hoạt. Đó là cơ cấu không gian hở (không kép kín), có bậc tự do dư thừa nên độ cơ động rất cao. Mỗi khâu của cơ cấu có động lực riêng và chúng được điều khiển bằng chương trình thay đổi được. Có loại robot lại có thể tự thay đổi được thao tác của mình một cách linh hoạt khi nhận biết được các tín hiệu từ sự hoạt động của bản thân (nội tín hiệu). Những cơ cấu như vậy gọi là cơ cấu điều khiển linh hoạt.

1.4.4. Robot song song.

Sơ đồ động cơ cấu tay máy thông thường là một chuỗi nối tiếp các khâu động, còn trong robot song song (RBSS) ở một khâu nào đó có thể nối động với nhiều khâu khác, tức là nối song song với nhau và cùng hoạt động song song với nhau. Sự khác nhau về sơ đồ động đó cũng gây ra nhiều đặc điểm khác biệt về động học và động lực học. Ví dụ, đối với robot thông thường thì giải bài toán động học thuận dễ dàng hơn nhiều so với bài toán động học ngược, còn đối với RBSS thì hoàn toàn ngược lại.

Vấn đề RBSS trở nên hấp dẫn nhiều nhà nghiên cứu từ giữa thập kỷ 90 khi nó được ứng dụng dưới dạng thiết bị có tên là Hexapod để tạo ra máy công cụ 5 trục CNC có trục ảo. Hexapod là một môđun RBSS được kết cấu trên nguyên lý cơ cấu Stewart. Cơ cấu này gồm có 6 chân, với độ dài thay đổi được, nối với giá và tấm động (moving platform) đều bằng các khớp cầu. Bằng cách thay đổi độ dài của các chân, có thể điều khiển sự định vị và định hướng của tấm động theo ý muốn. Stewart đã đề xuất sử dụng cơ cấu này để mô phỏng hoạt động của thiết bị bay.

Như đã biết, máy cắt gọt CNC 3 trục không đáp ứng được các yêu cầu gia công chính xác các bề mặt phức tạp. Vì thế xuất hiện nhu cầu tạo ra các máy CNC 5 trục, tức là ngoài các trục X, Y, Z bổ sung thêm 2 trục quay có thể thực hiện được trên bàn máy mang vật gia công hoặc trên giá đỡ trục dụng cụ cắt. Các máy CNC 5 trục này rất đắt tiền, gần gấp đôi máy CNC 3 trục. Nếu sử dụng cơ cấu Hexapod để tạo ra các trục hoặc tạo ra các trục bổ sung thì giá thành máy CNC trục ảo này có thể hạ thấp nhiều lần.

Ngoài các ứng dụng trong ngành chế tạo máy công cụ RBSS còn được áp dụng hiệu quả trong dụng cụ y học, trong hệ thống mô phỏng, trong thiết bị thiên văn, trắc địa và trong kỹ thuật phòng không v.v.

1.4.5. Các xu thế ứng dụng robot trong tương lai.

Robot ngày càng thay thế nhiều lao động

Ở đây chỉ đề cập đến robot công nghiệp. Trong tương lai kỹ thuật robot sẽ tận dụng hơn nữa các thành tựu khoa học liên ngành, phát triển cả về phần cứng, phần mềm và ngày càng chiếm lĩnh nhiều "trận địa" trong công nghiệp. Số lượng lao động được thay thế ngày càng nhiều vì một mặt giá thành robot ngày càng giảm do hàng vi điện tử giảm giá liên tục, mặt khác chi phí tiền lương và các khoản phụ cấp cho người lao động lại càng tăng.

Robot ngày càng trở nên chuyên dụng

Khi robot công nghiệp ra đời người ta thường cố gắng làm sao để biểu thị hết khả năng của nó. Vì thế xuất hiện rất nhiều loại robot vạn năng có thể làm được nhiều việc trên dây chuyền. Tuy nhiên, thực tế sản xuất chứng tỏ rằng, các robot chuyên môn hoá đơn giản hơn, chính xác hơn học việc nhanh hơn và quan trọng là rẻ tiền hơn robot vạn năng. Các robot chuyên dụng hiện đại đều được cấu thành từ các môđun vạn năng. Xu thế môđun hoá kết cấu robot ngày càng phát triển nhằm chuyên môn hoá việc chế tạo các môđun và từ các môđun đó sẽ cấu thành các kiểu robot khác nhau thích hợp cho từng loại công việc.

Robot ngày càng đảm nhận được nhiều loại công việc lắp ráp

Công đoạn lắp ráp thường chiếm tỷ lệ cao so với tổng thời gian sản xuất trên toàn bộ dây chuyền. Công việc khi lắp ráp đó lại đòi hỏi phải rất cẩn thận, không được nhầm lẫn, thao tác nhẹ nhàng, tinh tế và chính xác nên cần có thợ tay nghề cao và phải làm việc căng thẳng suốt ngày.

Khả năng thay thế người lao động ở những khâu lắp ráp ngày càng hiện thực là do đã áp dụng được nhiều thành tựu mới về khoa học trong việc thiết kế, chế tạo robot. Ví dụ tạo ra những cấu hình đơn giản và rất chính xác trên cơ sở sử dụng các vật liệu mới vừa bền, vừa nhẹ. Trong đó nên kể đến các loại robot như Adept One, SCARA, v...v. Đồng thời do được thừa hưởng sự phát triển kỹ thuật nhận và biến đổi tín hiệu (*sensor*), đặc biệt là kỹ thuật nhận và xử lý tín hiệu ảnh (*vision*) cũng như kỹ thuật tin học với các ngôn ngữ bậc cao, robot công nghiệp đã có mặt trên nhiều công đoạn lắp ráp phức tạp.

Robot di động ngày càng trở nên phổ biến

Trong các nhà máy hiện đại tên gọi phương tiện dẫn đường tự động AVG (Automatic Guided Vehicles) đã trở thành quen biết. Loại đơn giản là những chiếc xe vận chuyển trong nội bộ phân xưởng được điều khiển theo chương trình với một quỹ đạo định sẵn. Càng ngày các thiết bị

loại này cũng được hiện đại hoá nhờ áp dụng kỹ thuật vision ba chiều, kỹ thuật sensor tín hiệu xa, kỹ thuật thông tin vô tuyến hoặc dùng tia hồng ngoại v...v. Vì vậy AGV đã có thể hoạt động linh hoạt trong phân xưởng. Đó là những robot di động và còn gọi là robocar. Một hướng phát triển quan trọng của robocar là không di chuyển bằng các bánh xe mà bằng chân, thích hợp với mọi địa hình.

Robot đi được bằng chân có thể tự leo bậc thang là một đối tượng đang được rất chú ý trong nghiên cứu không những định hướng sử dụng trong công nghiệp hạt nhân hoặc trong kỹ thuật quốc phòng mà ngay cả trong công nghiệp dân dụng thông thường. Ở đây việc tạo ra các cơ cấu chấp hành cơ khí bền vững, nhẹ nhàng, chính xác và linh hoạt như chân người lại là đối tượng nghiên cứu chủ yếu.

Robot ngày càng trở nên tinh khôn hơn

Trí khôn nhân tạo là một vấn đề rất được quan tâm nghiên cứu với các mục đích khác nhau. Kỹ thuật robot cũng từng bước áp dụng các kết quả nghiên cứu về trí khôn nhân tạo và đưa vào ứng dụng công nghiệp. Trước hết là sử dụng các hệ chuyên gia, các hệ thị giác nhân tạo, mạng nơron và các phương pháp nhận dạng tiếng nói v.v... Cùng với những thành tựu mới trong nghiên cứu về trí khôn nhân tạo robot ngày càng có khả năng đảm nhận được nhiều nguyên công dây chuyền sản xuất đòi hỏi sự tinh khôn nhất định.

Vấn đề thiết bị cảm biến được nhiều ngành kỹ thuật quan tâm và cũng đạt được nhiều thành tự mới trong thời kỳ phát triển sôi động của kỹ thuật vi xử lý. Đó cũng là điều kiện thuận lợi cho việc áp dụng chúng trong kỹ thuật robot nhằm tăng cường khả năng thông minh của thiết bị.

Những loại hình được quan tâm nhiều trong công nghiệp là các robot thông minh có các môđun cảm biến nhận biết được khoảng cách để tránh vật cản khi thao tác, cảm biến nhận biết được màu sắc khi phân loại, cảm biến được lực khi lắp ráp v.v. Khi được lắp thêm các môđun cảm biến này robot được gọi nhiều tên mới, ví dụ, robot "nhìn được" (vision robot), robot lắp ráp (assembly robot), robot cảnh báo (alarm robot) v...v.

Để thông minh hoá robot bên cạnh việc cài đặt bổ sung các môđun cảm biến "nội tín hiệu" và các môđun cảm biến "ngoại tín hiệu" thì đồng thời có thể thông minh hoá robot bằng các chương trình phần mềm có khả năng tự thích nghi và tự xử lý các tình huống v...v.

Như vậy bằng cách bổ sung các môđun cảm biến và các môđun phần mềm phù hợp có thể nâng cấp cải tiến thông minh hoá nhiều loại robot. Tuy nhiên bản thân các robot này phải có các cơ cấu chấp hành linh hoạt và chính xác. Ngày nay có nhiều loại robot thông minh không

những có thể làm việc trong các phân xưởng công nghiệp mà còn thao tác được ở bên ngoài, trên các địa hình phức tạp như các loại robot vũ trụ (space robot), robot tự hành (walking robot), robot cần cẩu (robocrane), tạo dựng từ các môđun robot song song v...v.

1.5. TÌNH HÌNH TIẾP CẬN VÀ ỨNG DỤNG ROBOT CÔNG NGHIỆP Ở VIỆT NAM.

Trong giai đoạn trước năm 1990 hầu như trong nước hoàn toàn chưa du nhập về kỹ thuật robot, thậm chí chưa nhận được nhiều thông tin kỹ thuật về lĩnh vực này. Tuy vậy, với mục tiêu chủ yếu là tiếp cận kỹ thuật mới mẻ này, trong nước đã triển khai các đề tài nghiên cứu khoa học cấp nhà nước: Đề tài 58.01.03 trong giai đoạn 81 - 85 và đề tài 52 B.03.01 trong giai đoạn 86 - 89. Kết quả nghiên cứu của các đề tài này không những đáp ứng được yêu cầu tiếp cận mà còn có những ứng dụng ban đầu trong kỹ thuật bảo hộ lao động và phục vụ công tác đào tạo cán bộ kỹ thuật ở nước ta.

Giai đoạn tiếp theo từ năm 1990 các ngành công nghiệp trong nước bắt đầu được đổi mới. Nhiều cơ sở đã nhập ngoại nhiều dây chuyền thiết bị mới. Đặc biệt là ở một số cơ sở liên doanh với nước ngoài đã nhập ngoại nhiều loại robot phục vụ các công việc sau đây:

- Tháo lắp các dụng cụ cho các trung tâm gia công và các máy CNC.

- Lắp ráp các linh kiện điện tử.

- Tháo sản phẩm ở các máy ép nhựa tự động, trong đó có loại thao tác phối hợp với hệ thống giám sát, điều khiển bằng camera.

- Hàn vỏ xe ôtô.

- Phun phủ các bề mặt v.v.

Tuy nhiên còn có hàng chục cơ sở trong nước lúc mua dây chuyền đã không nhập các robot có trong danh mục các thiết bị của dây chuyền chào hàng. Trong đó có một số cơ sở đã nhận ra nhu cầu là phải có robot mới đảm bảo được chất lượng sản phẩm của dây chuyền như thiết kế. Vì vậy đã xuất hiện các nhu cầu bổ sung các robot đó.

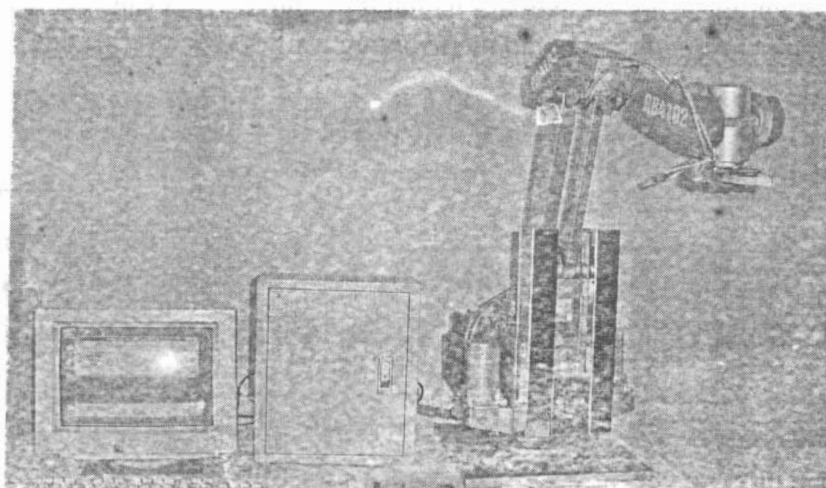
Một sự kiện đáng được quan tâm là từ tháng 4/98 Nhà máy Rorze/Robotech đã bước vào hoạt động ở khu công nghiệp Nomura Hải Phòng. Đây là nhà máy đầu tiên ở Việt Nam chế tạo và lắp ráp robot. Đó là loại robot có cấu trúc đơn giản nhưng rất chính xác dùng trong sản xuất chất bán dẫn. Nhà máy Rorze Robotech có vốn đầu tư là 46 triệu đô la Mỹ do Nhật Bản đầu tư.

Trong những năm gần đây Trung tâm Nghiên cứu Kỹ thuật (NCKT) Tự động hóa, trường Đại học Bách khoa (ĐHBK) – Hà Nội đã nghiên cứu tính toán thiết kế một kiểu robot mới, ký hiệu là Robot RP. Robot RP thuộc loại robot phỏng sinh (bắt chước cơ cấu tay người). Sự khác biệt của robot này với các kiểu robot phỏng sinh khác là ở đây dùng cơ cấu pantograph với 2 con trượt dẫn động làm môđun chủ yếu của cơ cấu tay máy. Cũng vì thế robot này được ký hiệu vắn tắt là RP. Hiện nay đã chế tạo ra hai mẫu: Robot RPS – 406 dùng để phun men, có hệ thống truyền dẫn thủy lực với 5 bậc tự do và Robot RPS – 4102 dùng trong công nghệ bề mặt, có 6 bậc tự do, 3 động cơ điện 1 chiều và 3 động cơ bước.

Trên hình 1.15 là ảnh chụp Robot RPS – 406 và trên hình 1.16 là robot RPS – 4102.



Hình 1.15. *Robot RPS - 406*

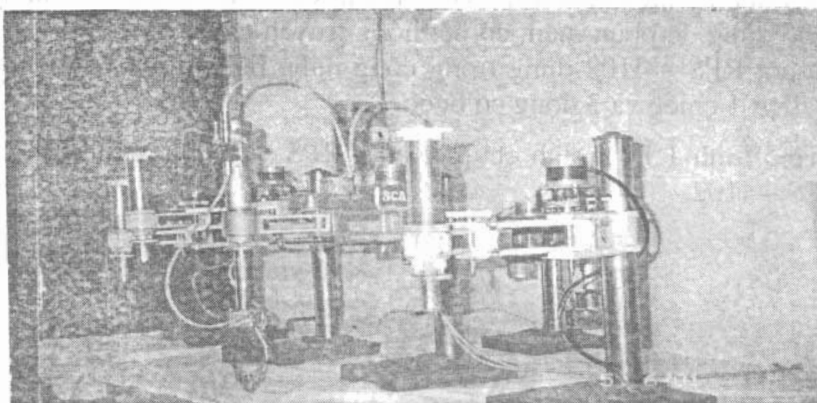


Hình 1.16. *Robot RPB - 410*

Cơ cấu chấp hành của Robot RPS – 4102 có 6 bậc tự do, chia thành 2 nhóm: nhóm 3 bậc tự do thứ nhất gọi là nhóm 3 (1), giống như trong Robot

RPS – 406, nhưng ở nhóm 3 (2) thì khác, ở đây dùng 3 môđun truyền độngvới động cơ bước để hình thành các chức năng của cổ tay.

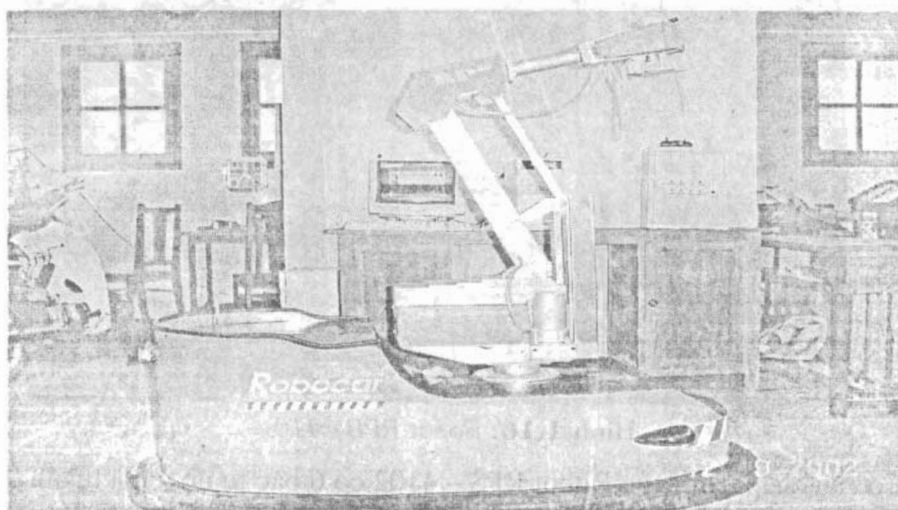
Trên hình 1.17 là ảnh chụp các Robot SCA mini do Trung tâm NCKT Tự động hóa, ĐHBK – Hà Nội thiết kế, chế tạo cung cấp cho một số trường, chủ yếu dùng để giảng dạy, học tập, nhưng đồng thời có thể sử dụng để lắp ráp hoặc sắp xếp các vật nhỏ dưới 1 kg.



Hình 1.17. *Robot SCA mini*

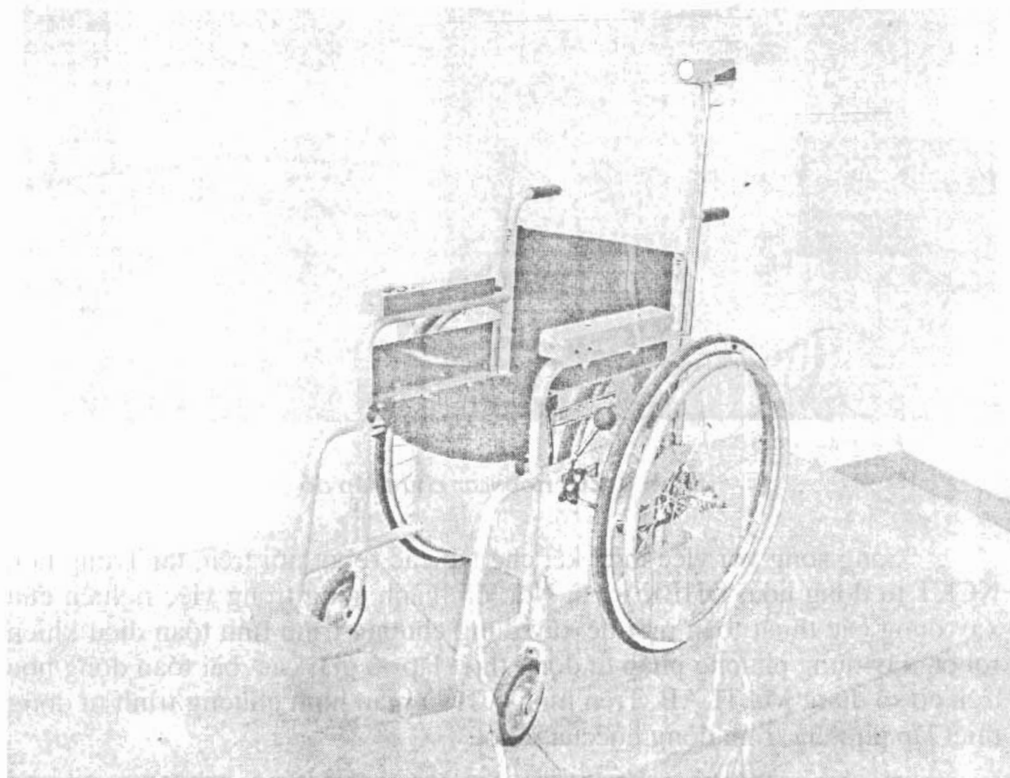
Các sản phẩm giới thiệu trên hình 1.18, hình 1.19 và hình 1.20 cũng do Trung tâm NCKT tự động hoá, ĐHBK - Hà Nội thiết kế, chế tạo.

Hình 1.18 là robocar công nghiệp, phục vụ trong phân xưởng. Nó có khả năng tự động nhận biết đường di chuyển, tự động phát hiện và xử lý khi gặp chướng ngại vật. Ngoài khả năng di chuyển trên sàn nó còn có 4 bậc tự do thao tác, dạng công gắp theo chương trình.



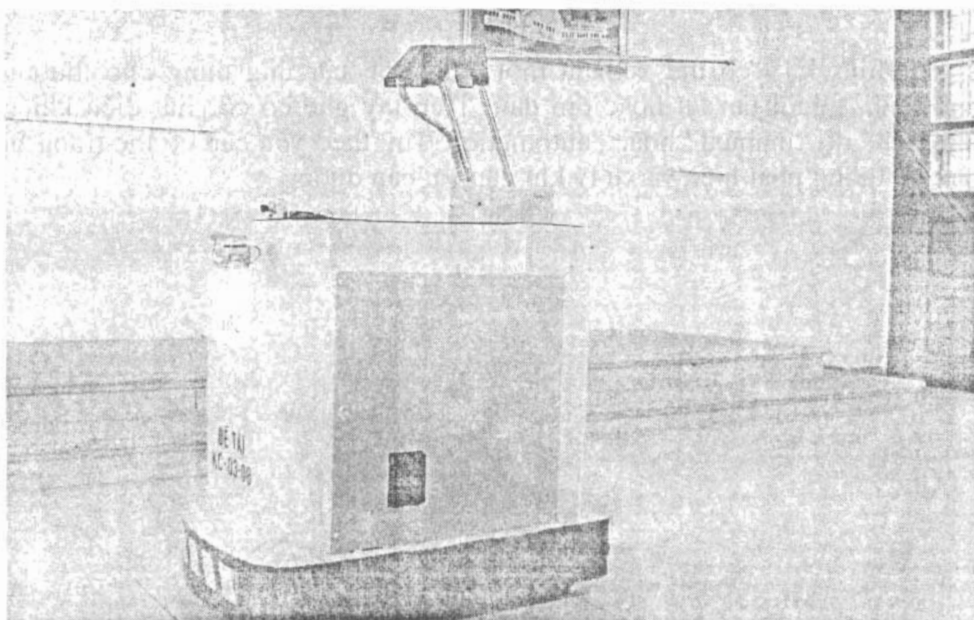
Hình 1.18. *Robocar phục vụ trong các phân xưởng*

Hình 1.19 có thể xem là một dạng robocar ứng dụng cho thương bệnh binh, người tàn tật hoặc ốm đau. Trên tay ghế có các nút điều khiển theo 2 chế độ "manual" hoặc "automatic". Tuỳ theo yêu cầu có thể trang bị thêm hệ thống phát hiện và xử lý khi gặp vật cản đường.



Hình 1.19. *Xe lăn điện chạy tự động*

Hình 1.20 là robocar "chữ thập đỏ" có thể tự động di chuyển theo hành trình định trước, biết xử lý khi gặp chướng ngại hoặc biết di chuyển với khoảng cách không đổi dọc theo tường chắn. Cơ cấu tay máy 2 bậc tự do giúp di chuyển trong không gian đầu phun hoá chất sát trùng dùng trong y tế.

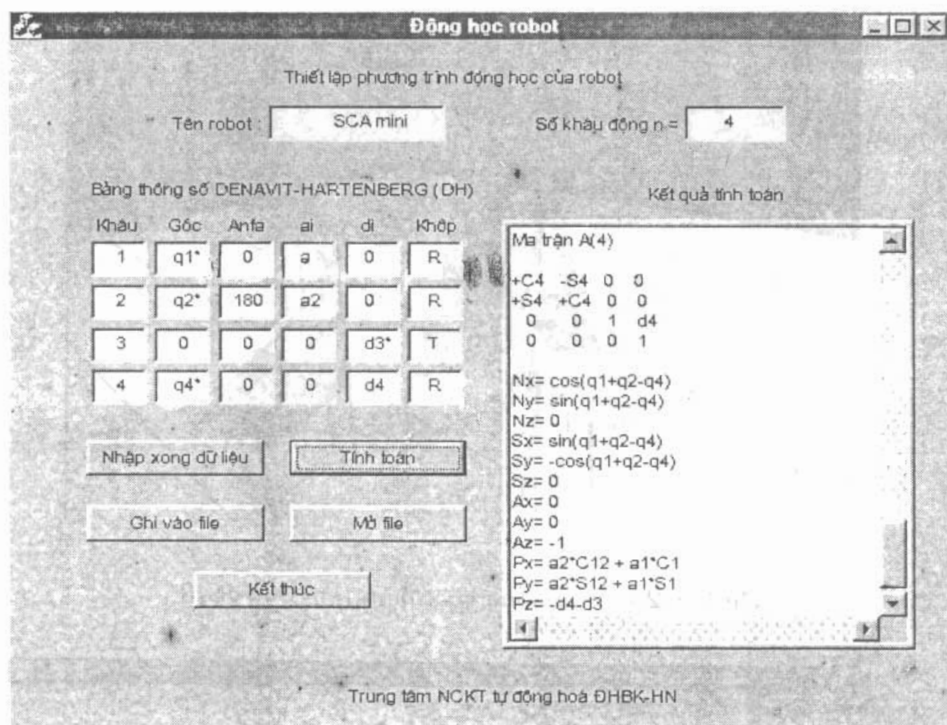


Hình 1.20. *Robocar chữ thập đỏ*

Song song với việc thiết kế, chế tạo các robot nói trên, tại Trung tâm NCKT tự động hóa, ĐHBK – Hà Nội, đã thành công trong việc nghiên cứu xây dựng các thuật toán mới để xây dựng chương trình tính tóan điều khiển robot, xây dựng phương pháp tự động thiết lập và giải các bài tóan động học trên cơ sở dùng MATLAB. Trên hình 1.21 là màn hình chương trình tự động thiết lập phương trình động họccủa robot.

Ngoài ra Trung tâm NCKT tự động hóa, ĐHBK – Hà Nội, còn tiến hành xây dựng "thư viện" các mô hình động của robot trong máy tính. Các robot này không nhưỡng được thiết kế theo thông số kỹ thuật của các cơ sở sản xuất, mà còn được xây dựng chương trình mô phỏng hoạt hình và chương trình điều khiển chúng. Với các chương trình này có thể trình diễn, giới thiệu với khách hàng về sự hoạt động của các robot mới được thiết kế mới. Qua đó cũng có thể trao đổi, hiệu chỉnh thiết kế theo yêu cầu.

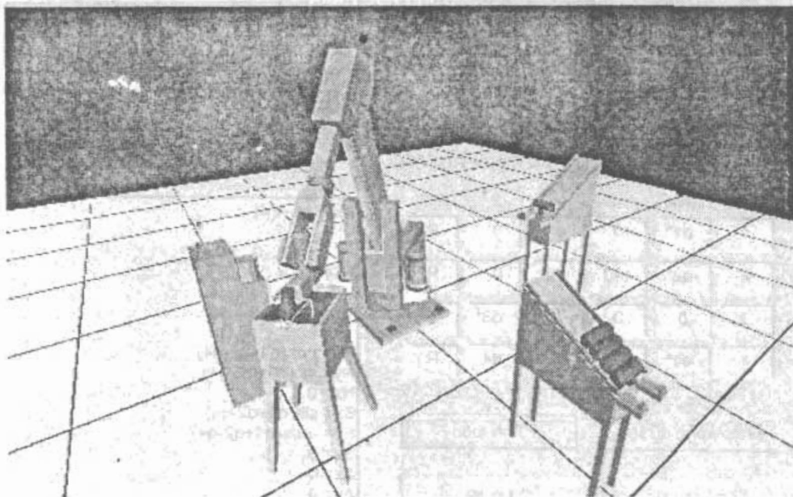
Trên hình 1.22 là màn hình mô phỏng hoạt hình robot RPS – 406 đang phun men, hình 1.23 – Robot RPB – 4102 phục vụ nhiệt luyện tôi cao tần, trên hình 1.24 – Robot SCA mini đang xếp hình và trên hình 1.25 mô phỏng hoạt hình Robot song song (RBSS).



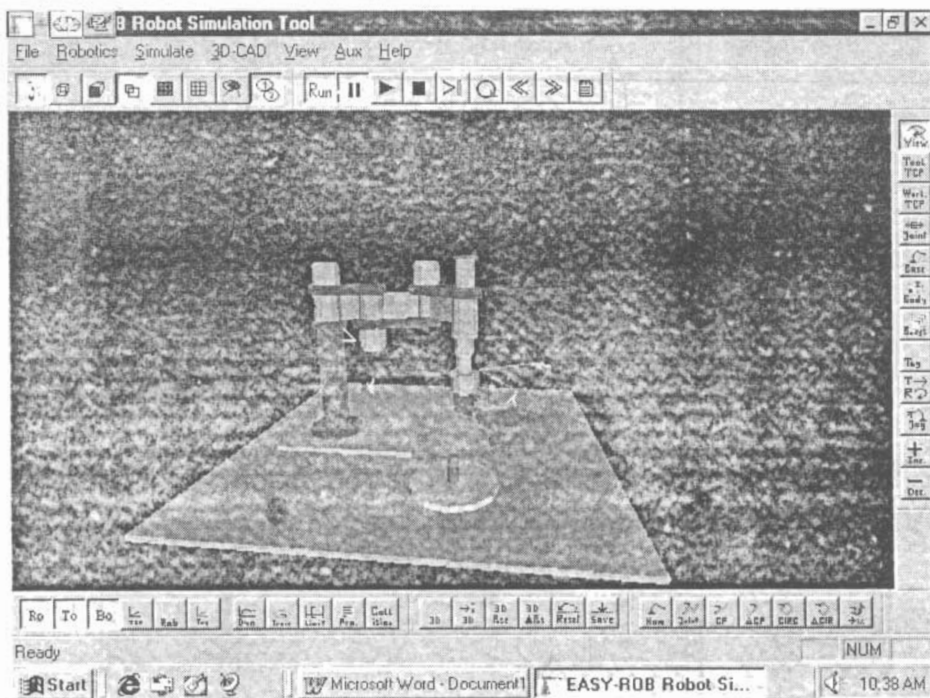
Hình 1.21. *Màn hình chương trình tự động thiết lập phương trình động học của robot*



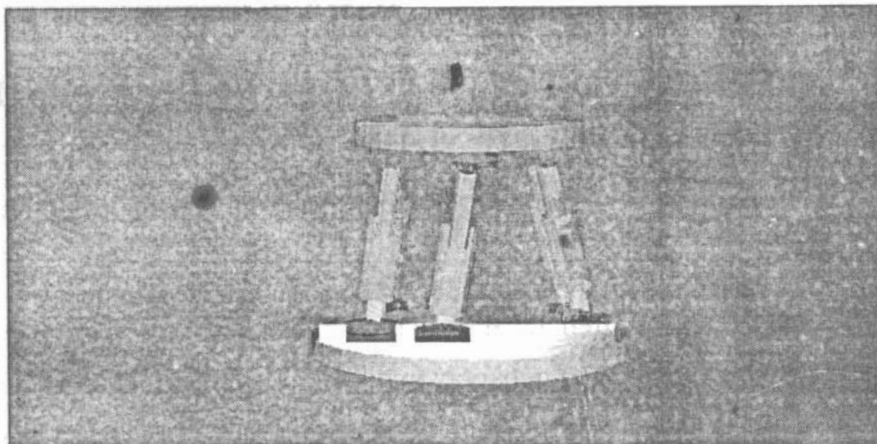
Hình 1.22. *Mô phỏng hoạt hình Robot RPS - 406*



Hình 1.23. *Mô phỏng hoạt hình Robot RPS-406*

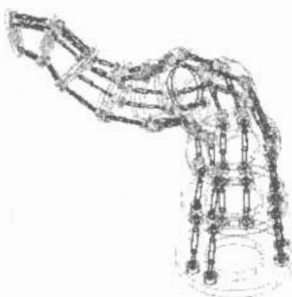


Hình 1.24. *Mô phỏng hoạt hình Robot SCA mini*



Hình 1.25. *Mô phỏng hoạt hình RBSS*

Trong [34] đã trình bày phương án tạo ra loại robot *n* bậc tự do bằng cách ghép nối tiếp các "khớp cơ sinh". Bản thân các "khớp cơ sinh" này là các môđun RBSS. Loại robot nhiều bậc tự do này linh hoạt như con rắn và có thể gọi tên là "con rắn RBSS". Trên hình 1.23 là hình mô phỏng "con rắn RBSS". Nó có thể tìm được nhiều ứng quan trọng như thao tác dưới đường hầm, trong ống ngầm v.v...



Hình 1.26. *Hình mô phỏng "Con rắn RBSS"*

CHƯƠNG II

CẤU TRÚC VÀ PHÂN LOẠI ROBOT CÔNG NGHIỆP.

2.1. CÁC BỘ PHẬN CẤU THÀNH ROBOT CÔNG NGHIỆP

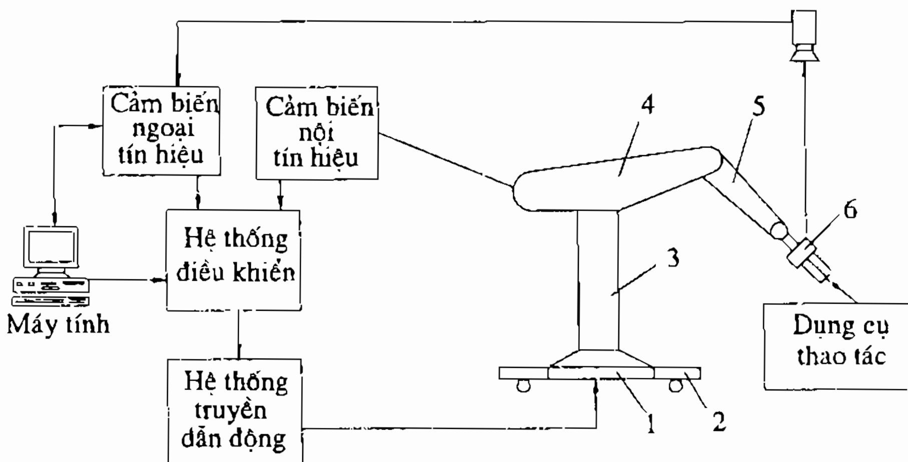
Trên hình 2.1 giới thiệu các bộ phận chủ yếu của robot công nghiệp loại thông thường.

Tay máy gồm các bộ phận: đế 1 đặt cố định hoặc gắn liền với xe di động 2, thân 3, cánh tay trên 4, cánh tay dưới 5, bàn kẹp 6.

Bên trong hoặc ở bên ngoài tay máy còn đặt nhiều bộ phận khác nữa:

Hệ thống truyền dẫn động có thể là cơ khí, thuỷ khí hoặc điện khí, là bộ phận chủ yếu tạo nên sự chuyển dịch ở các khớp động. Trong chương IX sẽ khảo sát các thiết bị truyền dẫn động này.

Hệ thống điều khiển đảm bảo sự hoạt động của robot theo các thông tin đặt trước hoặc nhận biết được trong quá trình làm việc. Trong chương VIII vấn đề này sẽ được đề cập đến.

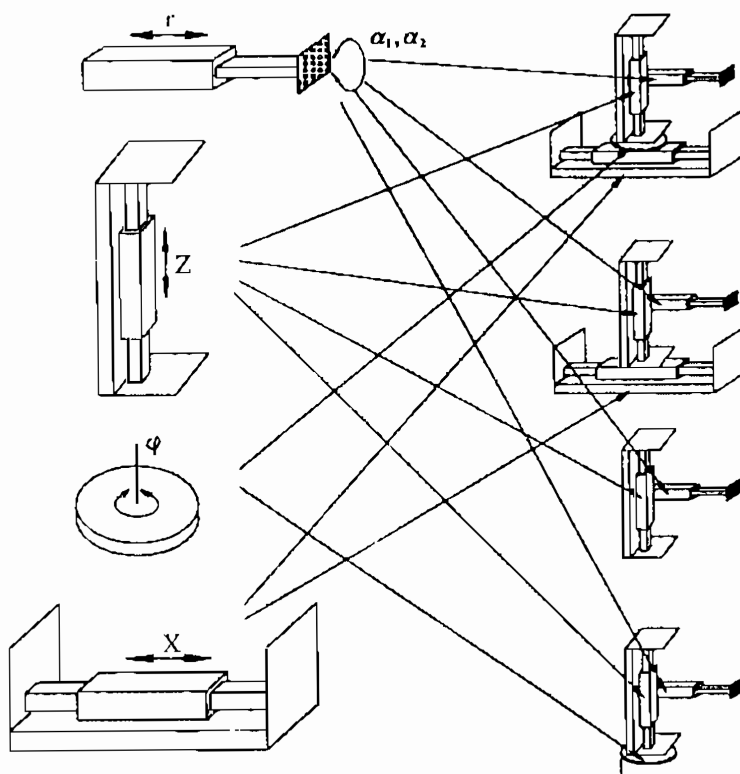


Hình 2.1. *Các bộ phận cấu thành robot*

Hệ thống cảm biến tín hiệu thực hiện việc nhận biết và biến đổi thông tin về hoạt động của bản thân robot (cảm biến nội tín hiệu) và của môi trường, đối tượng mà robot phục vụ (cảm biến ngoại tín hiệu). Trong chương XI sẽ trình bày về các thiết bị cảm biến.

Các thông tin đặt trước hoặc cảm biến được sẽ đưa vào hệ thống điều khiển sau khi xử lí bằng máy vi tính, rồi tác động vào hệ thống truyền dẫn động của tay máy.

Trực tiếp liên hệ với bàn kẹp là các dụng cụ (tools) thao tác với môi trường và đối tượng làm việc.



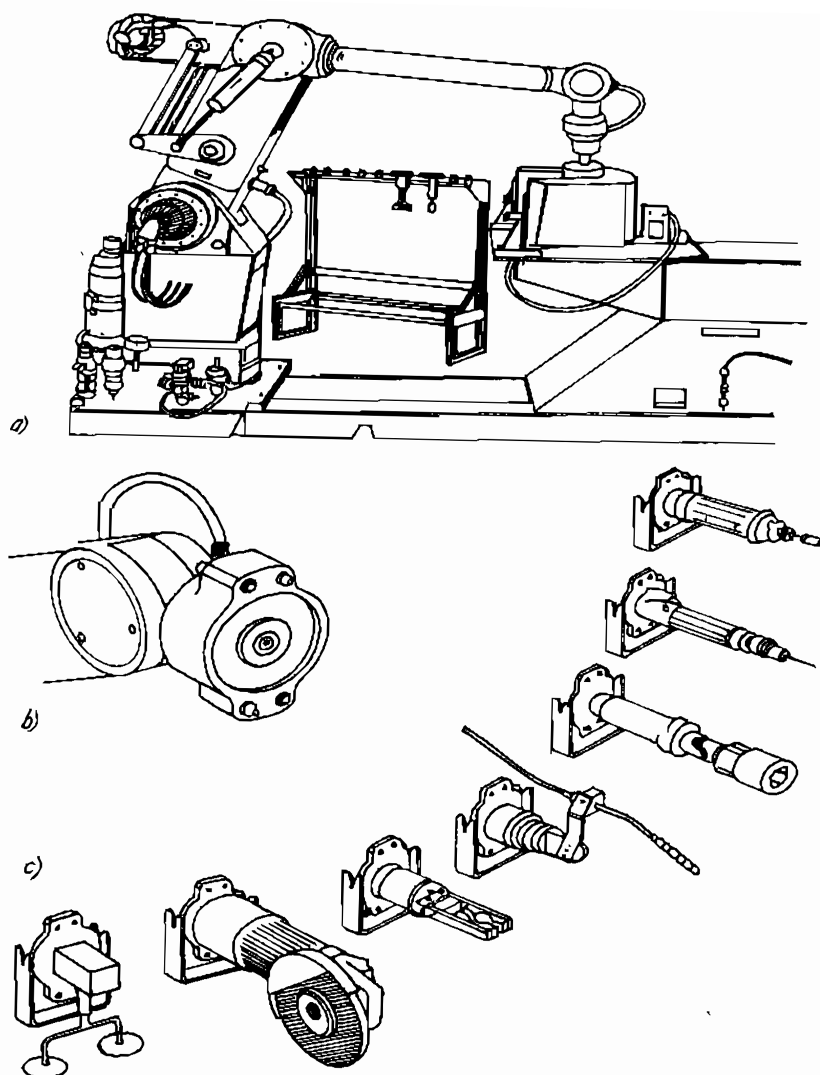
Hình 2.2. *Ví dụ về các kết cấu môđun.*

Các bộ phận nói trên ngày nay thường được kết cấu theo nguyên tắc môđun hoá. Hình 2.2 là một ví dụ về kết cấu của robot. Đặt trên đế dịch chuyển được theo phương X là phần thân cột quay được với góc φ. Trượt theo phương Z dọc trục thân cột là thân giá, mang trên mình cánh tay ngang. Trên cánh tay ngang này, tầm với của tay có thể thay đổi trong khoảng r, đồng thời cổ tay có thể quay một góc α.

Trên hình 2.3. a là robot Cincinnati Milacron - Dainichikiko (Mỹ - Nhật) có thể tự động thay dụng cụ thao tác dùng bộ phận chuẩn hoá hình 2.3b. Các dụng cụ thay thế mô tả trên hình 2.3c lần lượt là: bàn kẹp chân không, đá mài, bàn kẹp 2 ngón, súng phun sơn hoặc đầu hàn hơi, ốc vặn, mũi khoan, doa bóng v...v.

2.2. BẬC TỰ DO VÀ CÁC TỌA ĐỘ SUY RỘNG

Robot công nghiệp là loại thiết bị tự động nhiều công dụng. Cơ cấu tay máy của chúng phải được cấu tạo sao cho bàn kẹp giữ vật kẹp theo một



Hình 2.3. *Robot có dụng cụ thao tác thay thế được*

hướng nhất định nào đó và di chuyển dễ dàng trong vùng làm việc. Muốn vậy cơ cấu tay máy phải đạt được một số *bậc tự do* chuyển động.

Thường thường các khâu của cơ cấu tay máy được nối ghép với nhau bằng các khớp quay hoặc khớp tịnh tiến. Gọi chung chúng là *khớp động*. Các khớp quay và khớp tịnh tiến đều thuộc khớp động học loại 5, như đã biết trong giáo trình "Nguyên lý máy". Trong cơ cấu tay máy các khâu nối liên tiếp với nhau gọi là cơ cấu hở và thông thường mỗi khâu động gắn liền với nguồn động lực riêng, cho nên đối với các loại cơ cấu dùng các khớp động loại 5 thì số bậc tự do của cơ cấu bằng số khâu động.

Trong trường hợp chung có thể tính toán số bậc tự do theo công thức thông dụng trong Nguyên lý máy:

$$W = 6n - \sum_{i=1}^{5} ip_i \qquad (2.1)$$

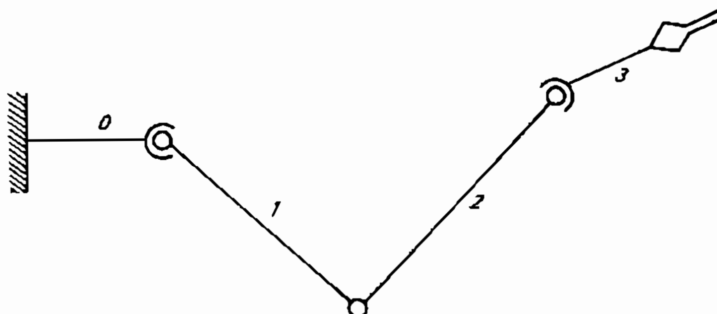
với

n - số khâu động.

p_i - số khớp loại i.

Ví dụ, đối với cơ cấu sơ đồ tay người (hình 2.4) có 3 khâu động: khớp vai (giữa khâu 0 và khâu 1) và khớp cổ tay (giữa khâu 2 và khâu 3) là các khớp cầu p_3, còn khớp khuỷu tay (giữa khâu 1 và khâu 2) là khớp quay p_5. Như vậy theo công thức (2.1), số bậc tự do của cơ cấu sơ đồ tay người W = 7. Người ta quy ước là số bậc tự do của cơ cấu tay máy là không kể đến các chuyển động đóng mở của bàn kẹp.

Như vậy, đối với cơ cấu hở, số bậc tự do của cơ cấu bằng tổng số bậc tự do của các khớp động.



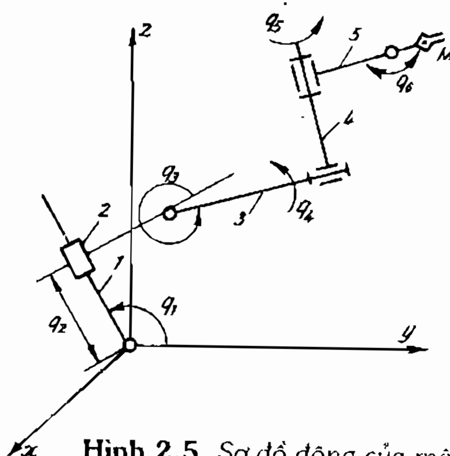
Hình 2.4. *Cơ cấu sơ đồ tay người*

Hình 2.4 chỉ là cơ cấu sơ đồ tay người, còn bản thân tay người phức tạp hơn nhiều và có đến 27 bậc tự do nên thao tác vô cùng tinh xảo. Khi mới ra đời, các robot đầu tiên được thiết kế bắt chước tay người không chỉ về công dụng mà cả về hình dáng bên ngoài. Nhiều loại tay máy xuất hiện sau này lại trông không giống tay người nữa nhưng vẫn thực hiện được các chuyển động trong không gian như tay người.

Trong [34] đã đưa ra khái niệm về "khớp động cơ sinh". Cơ cấu tay máy có *n* khâu động nối với nhau bằng các khớp động cơ sinh này là cơ cấu tay máy phỏng sinh ở dạng tổng quát nhất. Từ trường hợp tổng quát này có thể suy ra các trường hợp riêng như trường hợp có các khớp động thông

thường, trường hợp cơ cấu có một hoặc vài khâu khép kín, trường hợp đó gọi là cơ cấu tay máy song song v...v.

Trong các sơ đồ động của robot công nghiệp thường gặp, các khớp động đều là khớp quay hoặc khớp tịnh tiến. Trên hình 2.5 là ví dụ về sơ đồ của một tay máy.



Hình 2.5. *Sơ đồ động của một tay máy toạ độ suy rộng.*

Các cấu hình khác nhau của cơ cấu tay máy trong từng thời điểm được xác định bằng các độ dịch chuyển góc hoặc độ dịch chuyển dài của các khớp động hoặc khớp tịnh tiến.

Các độ dịch chuyển tức thời đó, so với giá trị ban đầu nào đó lấy làm mốc tính toán, được gọi là các **toạ độ suy rộng** (generalized joint coordinates) trong nhiều tài liệu kỹ thuật về robot công nghiệp. Ở đây người ta còn gọi chúng là các giá trị *biến khớp* (joint variable).

Sơ đồ động trên hình 2.5 có 6 khớp động loại p_5, tức là có 6 bậc tự do. Trong 6 độ dịch chuyển q_1 đến q_6, tức là 6 biến khớp (hoặc 6 toạ độ suy rộng), chỉ có q_2 là độ dịch chuyển của khớp tịnh tiến giữa khâu 2 đối với khâu 1, còn lại là các dịch chuyển góc của các khớp quay.

Trong trường hợp chung ta gọi q_i, i = 1, ..., n là các biến khớp (toạ độ suy rộng) của cơ cấu tay máy và biểu thị bằng:

$$q_i = \delta_i \theta_i + (1 - \delta_i) S_i \qquad (2.2)$$

với

$$\delta_i = \begin{cases} 1, \text{ đối với khớp quay} \\ 0, \text{ đối với khớp tịnh tiến} \end{cases}$$

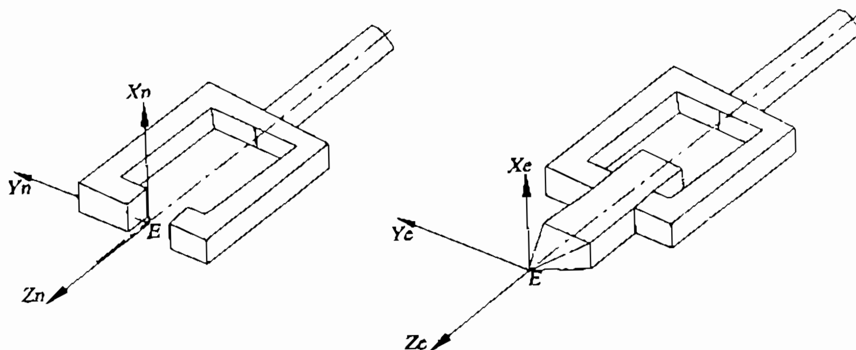
θ_i - độ dịch chuyển góc của các khớp quay

S_i - độ dịch chuyển tịnh tiến của các khớp tịnh tiến.

2.3. NHIỆM VỤ LẬP TRÌNH ĐIỀU KHIỂN ROBOT

1) Định vị và định hướng tại "điểm tác động cuối".

Khâu cuối cùng của cơ cấu tay máy thường là bàn kẹp (gripper) hoặc là khâu gắn liền với dụng cụ thao tác (tool). Điểm mút của khâu cuối cùng là điểm đáng quan tâm nhất vì đó là điểm tác động của robot lên đối tác và được gọi là "điểm tác động cuối" (end - effector). Trên hình 2.6 điểm E là "điểm tác động cuối" khi bàn kẹp là khâu cuối và khi dụng cụ thuộc về khâu cuối.



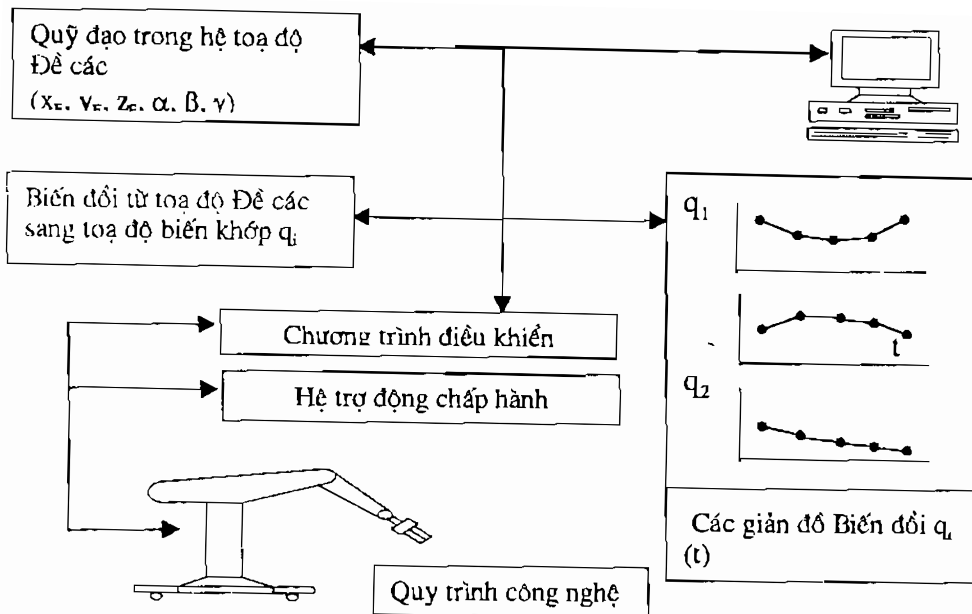
Hình 2.6. *Định vị và định hướng tại "điểm tác động cuối"*

Chính tại "điểm tác động cuối" E này cần quan tâm không những vị trí nó chiếm trong không gian làm việc mà cả hướng tác động của khâu cuối đó. Vị trí của điểm E được xác định bằng 3 tọa độ x_E, y_E, z_E trong hệ toạ độ cố định. Còn hướng tác động của khâu cuối có thể xác định bằng 3 trục x_n, y_n, z_n gắn liền với khâu cuối tại điểm E, hoặc bằng 3 thông số góc α, β, γ nào đó.

Giá trị của 3 toạ độ x_E, y_E, z_E và 3 thông số góc α, β, γ đều phụ thuộc vào giá trị các biến khớp q_i của cơ cấu tay máy.

2) Lập trình điều khiển robot công nghiệp

Trên hình 2.7 mô tả một sơ đồ lập trình điều khiển robot công nghiệp. Khi robot nhận nhiệm vụ thực hiện một quy trình công nghệ nào đó, ví dụ, "điểm tác động cuối" E phải bám theo một hành trình cho trước. Quỹ đạo hành trình này thường cho biết trong hệ toạ độ Đề các x_0, y_0, z_0 cố định. Ở mỗi vị trí mà điểm E đi qua xác định bằng 3 toạ độ định vị x_E, y_E, z_E và 3 thông số góc định hướng α, β, γ. Từ các thông số trong toạ độ Đề các đó tính toán các giá trị biến khớp q_i tương ứng với mỗi thời điểm t. Đó là nội dung bài toán động học ngược sẽ trình bày trong Chương V. Máy tính có thể giúp giải bài toán ngược đó. Rồi theo các giản đồ biến đổi q_i (t), chương trình điều khiển tác động vào cơ cấu robot qua các hệ thống trợ động chấp hành như: bộ biến đổi và khuyếch đại tín hiệu, các van, các công tắc hành trình v...v.



Hình 2.7. *Sơ đồ lập trình điều khiển*

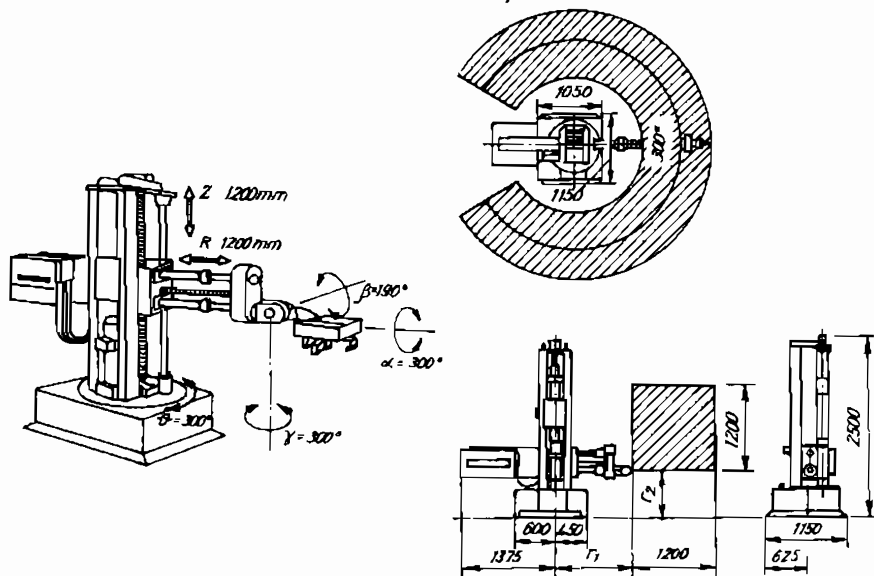
2.4. HỆ TOẠ ĐỘ VÀ VÙNG LÀM VIỆC

1) Hệ toạ độ.

Các chuyển động cơ bản của tay máy có thể hoạt động trong các hệ toạ độ khác nhau:

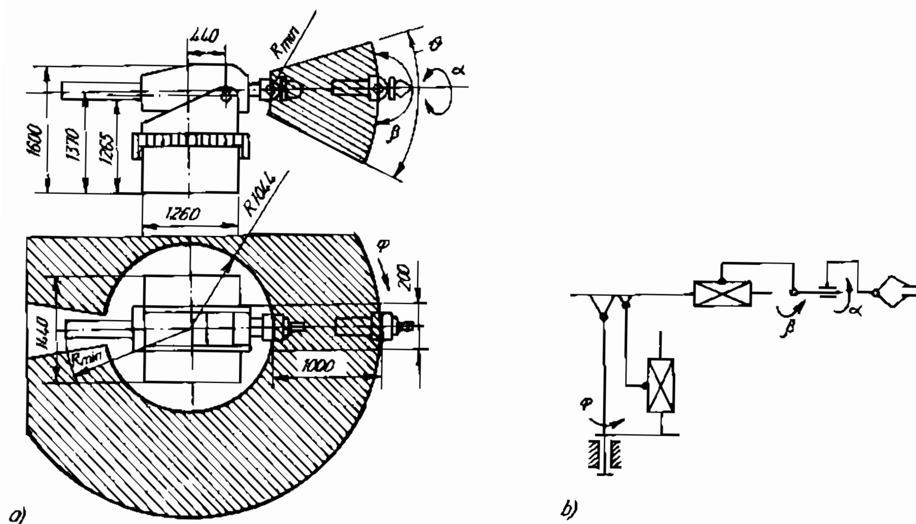
Hệ toạ độ trụ. Robot Versatran của Hãng AMF (Hoa Kỳ) là một trong những kiểu robot xuất hiện đầu tiên trên thế giới, cũng có chuyển động cơ bản hoạt động trong hệ toạ độ trụ này.

Trong số nhiều loại robot cải tiến Versatran, có robot Fanuc M (Nhật Bản) giới thiệu trên hình 2.8. Trên thân đế có thân trụ quay góc θ. Chuyển động thẳng đứng theo chiều Z và chuyển động hướng kính R được thực hiện bằng các bộ truyền vít đai ốc bi. Phần cổ tay được thiết kế để thực hiện các góc quay α, β và γ xung quanh 3 trục vuông góc.



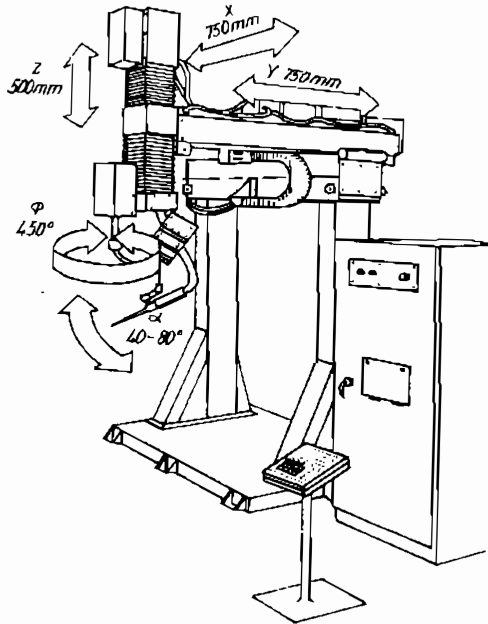
Hình 2.8. *Robot Facnuc M hoạt động theo hệ toạ độ trụ*

Hệ toạ độ cầu. Loại robot có các chuyển động cơ bản hoạt động trong hệ toạ độ cầu, điển hình là loại Unimate (của Hoa Kỳ) và các biến



Hình 2.9. *Robot Universal - 15 hoạt động theo hệ toạ độ cầu.*

thế của nó như là Kawasaki, Mitsubishi (Nhật Bản, Hoa Kì), Prab, Stanford (Hoa Kỳ), Universal (Nga) v.v... Trên hình 2.9 là sơ đồ robot Universal - 15. Các chuyển động cơ bản gồm: quay trên φ, nâng nghiêng góc θ và tịnh tiến hướng kính. Ngoài ra còn 2 chuyển động với góc xoay α và β ở phần cổ tay.

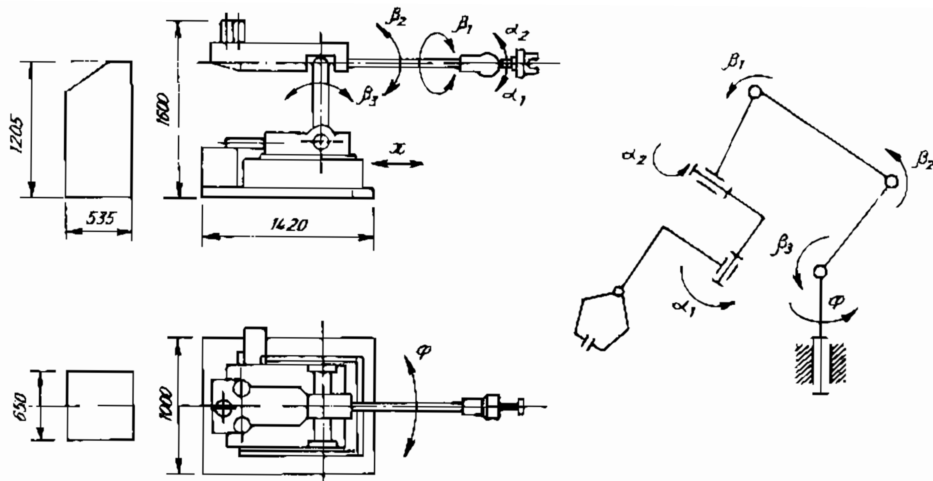


Hình 2.10. *Robot Shin Meiwa PW 752 hoạt động theo hệ toạ độ vuông góc*

Hệ toạ độ vuông góc. Đối với các loại robot hoạt động trong hệ toạ độ vuông góc, các chuyển động cơ bản là các chuyển động tịnh tiến dọc theo các trục X, Y, Z. Trên hình 2.10 là robot của Hãng Shin Meiwa PW 752 (Nhật Bản) dùng để hàn hồ quang. Ngoài các chuyển động cơ bản, thiết bị đầu hàn có thể quay với góc φ xung quanh một trục lệch tâm và có thể xoay nghiêng góc α.

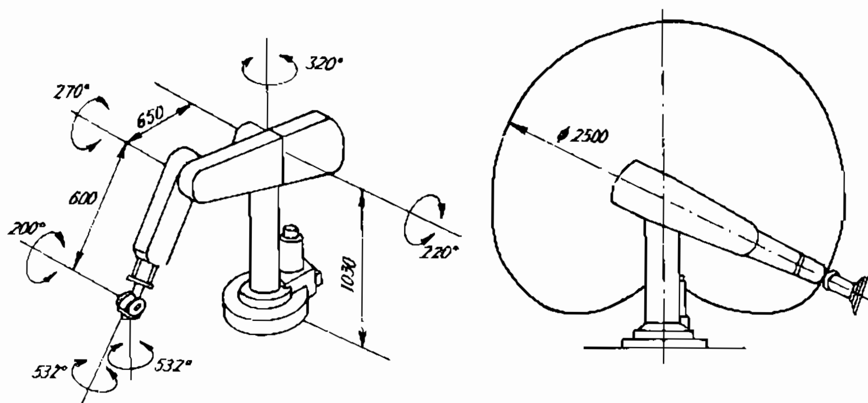
Hệ toạ độ góc (hệ toạ độ phỏng sinh).

Đây là hệ toạ độ được dùng nhiều hơn cả. Ba chuyển động cơ bản đầu tiên đều thực hiện các góc xoay (các góc φ, β_3 và β_2 trên hình 2.11), tức là các chuyển động cơ bản được xác định bằng 3 góc xoay trong hệ toạ độ góc. Ngoài thân quay với góc φ, phần còn lại là cánh tay, gồm cánh tay trên quay với góc β_3, cánh tay dưới quay với góc β_2, góc lắc bàn tay β_1 và 2 góc quay cổ tay α_2 và α_1. Tất cả phần cánh tay đều nằm trên mặt phẳng thẳng đứng nên các tính toán cơ bản đều là bài toán phẳng. Khi mặt phẳng này quay đi góc φ, bàn kẹp có thể đạt tới bất kì vị trí nào trong vùng làm việc. Ưu điểm nổi bật của các loại robot hoạt động theo hệ toạ độ phỏng sinh là gọn nhẹ, tức là vùng thao tác tương đối lớn so với kích cỡ của bản thân robot.



Hình 2.11. *Robot hoạt động theo hệ toạ độ phỏng sinh.*

Trong số các loại robot hoạt động theo hệ toạ độ phỏng sinh nên kể đến các loại như Puma của Hãng Unimation - Nokia (Hoa Kì - Phần Lan), IRb-6, IRb-60 ASEA (Thuỵ Điển), GDA - EKE (Đức - Phần Lan), Tosman - Toshiba, Mitsubishi, Mazak (Nhật Bản), Kuka (Đức), Cincinnaty Milacron (Hoa Kì - Nhật Bản) v.v... Trên hình 2.12 là Robot Puma 760 với hệ toạ độ phỏng sinh.



Hình 2.12 *Robot Puma 760 với hệ toạ độ phỏng sinh.*

2) Vùng làm việc

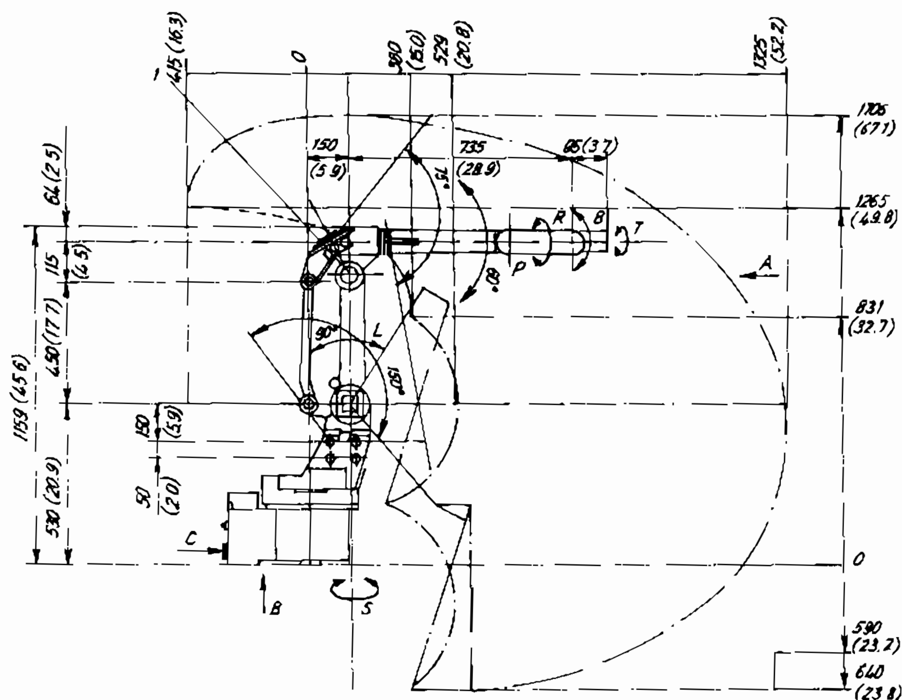
Vùng làm việc của robot là khoảng không gian mà nó có thể thao tác được.

Trên hình 2.13 mô tả vùng làm việc của các robot IRb-6 và IRb-60 của Hãng ASEA, ngày nay đã hợp nhất thành Hãng ABB.

A	B	C	D	E	F	G	
1159	670	289	200	1620	1150	414	mm
2288	1280	989	400	2150	1600	0	mm

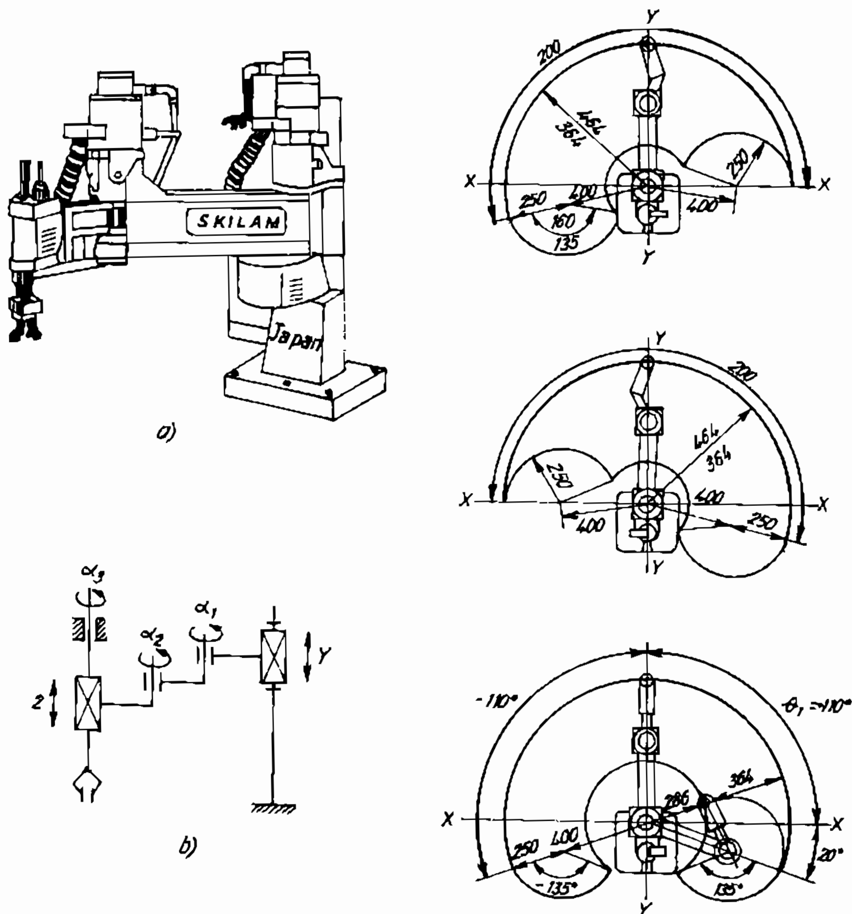
Hình 2.13. *Vùng làm việc của Robot IRb-6 và IRb-60*

Trên hình 2.14 là vùng làm việc của Robot Motoman của Hãng Yaskawa (Nhật Bản).



Hình 2.14. Vùng làm việc của robot Motoman

Sự đa dạng của sản xuất đã thúc đẩy sự ra đời nhiều loại robot mới kể cả các hệ toạ độ mới, không hoàn toàn giống như các hệ toạ độ đã kể trên. Ví dụ, trong những năm 80 đã xuất hiện một loại robot mới của Nhật Bản, với tên gọi là SCARA (Selectively Compliant Articulated Robot Arm) - tay máy mềm dẻo tuỳ ý. Loại robot này thường dùng để lắp ráp, nên SCARA đôi khi lại được giải thích là từ viết tắt của "Selective Compliace Assembly Robot Arm". Cấu trúc động học của loại robot này cũng có thể xem như thuộc hệ toạ độ phỏng sinh, chỉ có khác là các trục quay của các khớp động đều thẳng đứng.



Hình 2.15. *Robot Skilam và các vùng làm việc*

Ngày nay có nhiều loại robot là biến thể của SCARA, ví như robot Skilam (Hãng Sankyo Seiki - Nhật Bản), Adept - One (Hoa Kì), Sony, Nam Robo (Hãng Nahanishi - Nhật Bản) v.v... Trên hình 2.15 loại robot Skilam có sơ đồ động (hình 2.15b) và các vùng làm việc khi quay phải, quay trái hoặc quay cả hai phía.

Trên hình 2.16 giới thiệu một trong 5 loại robot được nghiên cứu, thiết kế, chế tạo tại Trung tâm Nghiên cứu Kỹ thuật Tự động hoá, Đại học Bách Khoa - Hà Nội. Loại robot này ký hiệu là Robot RP. Chữ P để chỉ đặc điểm ở đây sử dụng cơ cấu Pantograph có 2 con trượt dẫn động như một modun cơ cấu tay máy chuẩn hoá. Gọi đây là môđun chuẩn hoá vì từ đó có thể tạo dựng nhiều kiểu cơ cấu tay máy khác nhau.

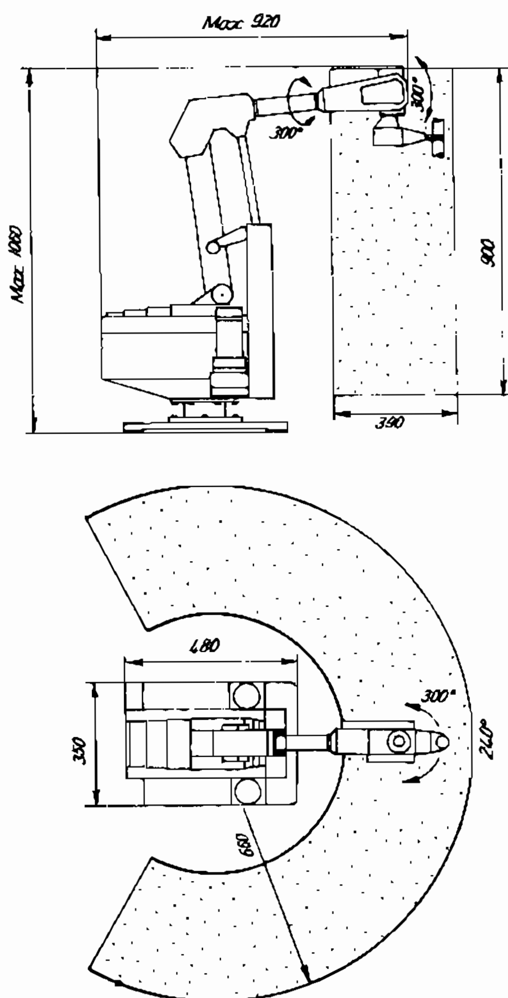
Loại hình cơ cấu tay máy này có các ưu điểm sau:

- Có thể bố trí nguồn động lực gần với thân tay máy nhưng vẫn đảm bảo chuyển động độc lập của các khâu chấp hành.

- Đảm bảo đơn giản về kết cấu, linh hoạt về cấu trúc và nhỏ gọn về kích thước.

- Dễ dàng giữ cân bằng ở các vị trí khác nhau và ít tiêu hao năng lượng.

- Dễ tính toán điều khiển do có thể thực hiện dễ dàng các chuyển dịch các con trượt riêng rẽ và do các bài toán động học đều có thể đưa về bài toán phẳng.

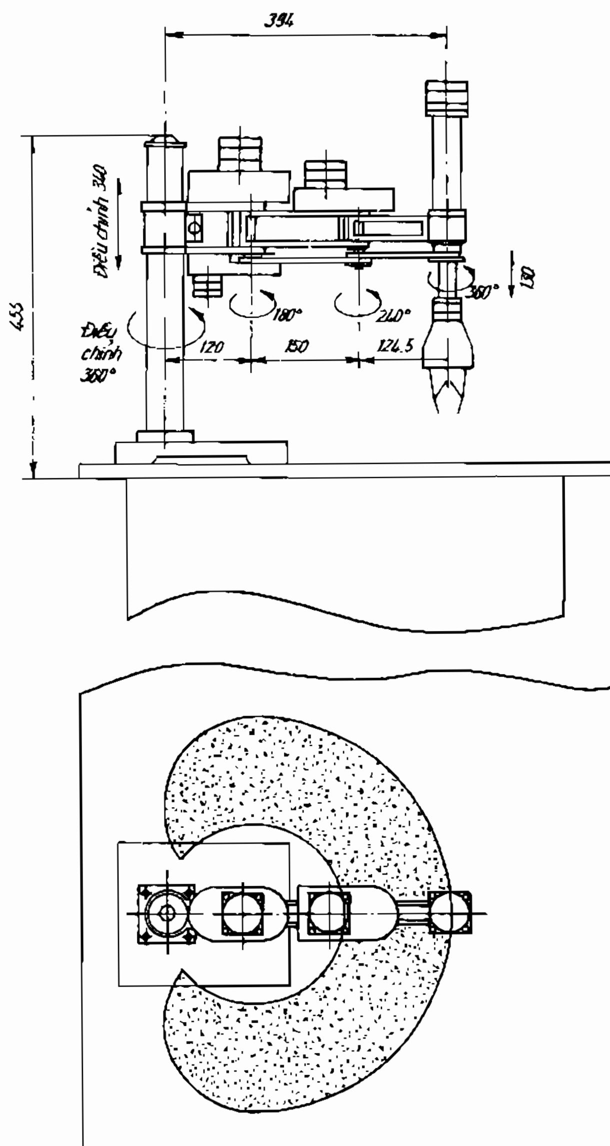


Hình 2.16. *Robot RP*

Trên hình 2.17 giới thiệu Robot SCA mini, do Trung tâm NCKT tự động hoá. ĐHBK - Hà Nội thiết kế, chế tạo. Robot SCA mini có 4 bậc tự do chuyển động, được thực hiện bằng các động cơ bước.

2.5. CHỈ TIÊU ĐÁNH GIÁ VÀ CÁC THÔNG SỐ KĨ THUẬT

Để các cơ cấu tay máy hoạt động linh hoạt tức là có thể thực hiện được



Hình 2.17. *Robot SCA mini*

dễ dàng các chuyển dịch muôn màu muôn vẻ, chúng cần phải có một số bậc tự do chuyển động cần thiết. Như đã biết với các cơ cấu tay máy dùng các cơ cấu hở không gian có các khớp động loại 5 thì số bậc tự do bằng số khâu động. Khi tăng số bậc tự do tức là tăng số khâu động và tăng số thiết bị động lực cho các khâu động đó nên sẽ tăng độ phức tạp về kết cấu và chế tạo. Vấn đề đặt ra là khi cùng số bậc tự do có thể chọn lựa cơ cấu tay máy nào đảm bảo tính linh hoạt cao hơn.

Tính linh hoạt của cơ cấu tay máy là một chỉ tiêu tổng hợp được thể hiện qua các yếu tố sau:

1) Độ cơ động của cơ cấu

Như đã trình bày ở phần trên, ở mỗi điểm của quỹ đạo vị trí và định hướng tại "điểm tác động cuối" E của cánh tay robot được xác định bằng 6 toạ độ x_E, y_E, z_E, α, β, γ. Trong lúc mỗi cấu hình của cơ cấu tay máy được xác định bằng n giá trị biến khớp q_1 ... q_n. Số bậc tự do n của cơ cấu tay máy có thể bằng hoặc khác 6. Có thể xảy ra 3 trường hợp sau:

- Nếu n = 6, khi điểm E thực hiện di chuyển nhỏ δx_E, δy_E, δz_E, δ_α, δ_β, δ_γ sang một vị trí mới nào đó, thì có thể xác định δq_1, ... δq_n một cách đơn trị.

- Nếu n < 6 thì không phải lúc nào điểm E cũng đạt tới vị trí với định hướng như yêu cầu được.

- Nếu n > 6 thì có nhiều lời giải để điểm E đạt tới vị trí với định hướng đã yêu cầu.

Hiệu số n - 6 = m được gọi là độ cơ động của cơ cấu tay máy. Có thể xác định độ cơ động m bằng số bậc tự do còn lại của cơ cấu nếu giữ cố định bàn kẹp lại. Ví dụ, trong trường hợp cơ cấu hình 2.4 nếu bàn kẹp kẹp vật ở vị trí cố định, tức là khâu 3 sẽ trở nên cố định và số khâu động còn lại là 2. Tính theo công thức (2.1) lúc này cơ cấu còn lại 1 bậc tự do (w = 1).

Sự tồn tại độ cơ động (m>1) là có lợi vì khi đó cơ cấu tay máy có thể đạt tới đích với nhiều phương án khác nhau. Điều đó càng quan trọng nhất là khi môi trường làm việc có các chướng ngại. Tuy nhiên để có độ cơ động cao, tức là cần số bậc tự do cao thì độ phức tạp kết cấu tay máy cũng tăng theo và sẽ không tránh khỏi việc tăng giá thành và giảm độ chính xác chuyển động.

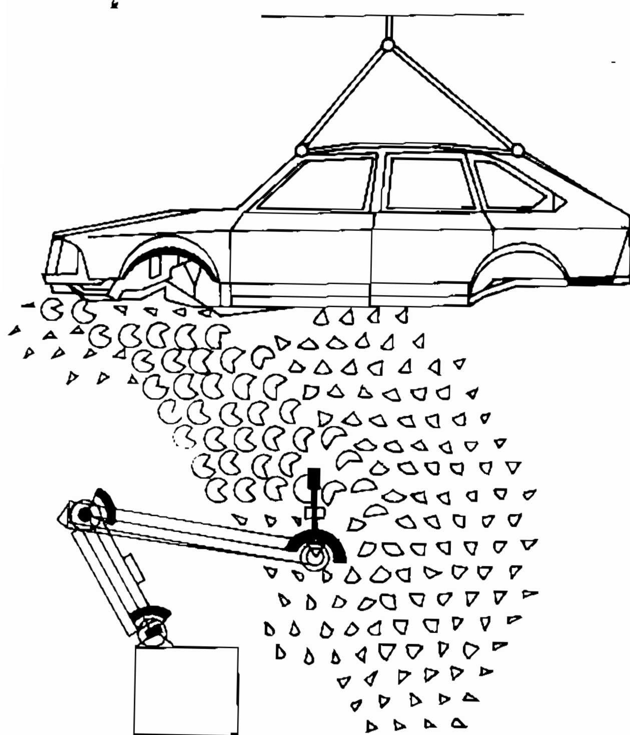
2) Hệ số phục vụ.

Trong vùng làm việc, tức là trong khoảng không gian mà bàn kẹp tay máy có thể thao tác được, không phải ở bất cứ điểm nào trong vùng này bàn kẹp tay máy cũng thao tác dễ dàng như nhau. Để đánh giá mức độ dễ dàng thao tác đó người ta dùng khái niệm hệ số phục vụ.

Hệ số phục vụ ξ là tỷ số giữa góc phục vụ λ so với 4 π. Góc phục vụ λ là góc nón quét một vùng không gian mà chỉ ở phía trong đó bàn kẹp mới có thể hướng tới toạ độ cần thiết.

$$\xi = \frac{\lambda}{4\pi} \qquad (2.3)$$

Giá trị của λ và ξ không những phụ thuộc vào vị trí điểm thao tác trong vùng làm việc, mà còn phụ thuộc vào kết cấu của tay máy.



Hình 2.18. *Các giá trị ξ khác nhau trong vùng làm việc của robot phun sơn*

Trên hình 2.18 là kết quả tính toán trên máy tính các giá trị ξ ở các vùng làm việc khác nhau trong không gian hoạt động của robot phun sơn và được biểu thị bằng phần diện tích của hình tròn đơn vị.

3) Độ dễ điều khiển của cơ cấu tay máy

Trong thực tế điều khiển hoạt động của tay máy, từ khi nhận được tín hiệu về định vị và định hướng của "điểm tác động cuối" E tại một điểm của quỹ đạo, cho tới khi điều khiển để đạt được mục tiêu đó, robot phải thực hiện hoạt động đó trong một khoảng thời gian nhất định. Thời gian đó bao gồm thời gian tính toán để xác định các thông số điều khiển và thời gian thực hiện di chuyển.

Tổng các thời gian đó có thể gọi là thời gian điều khiển. Trong đó thời gian tính toán giá trị các biến khớp q_i theo các thông số định vị và định hướng tại điểm E, phụ thuộc vào loại cơ cấu tay máy, như sẽ trình bày trong chương V.

Qua thông số thời gian điều khiển nói trên có thể xác định mức độ khó dễ điều khiển, như một chỉ tiêu đánh giá cơ cấu tay máy.

4) Các thông số kỹ thuật của robot công nghiệp

Robot công nghiệp thường được đặc trưng bằng bảng các thông số kỹ thuật cơ bản (xem bảng 2.1).

Hệ truyền dẫn động được ghi rõ là thuỷ lực, khí nén, động cơ điện 1 chiều, động cơ bước v.v... Trong chương IX sẽ phân tích về khả năng ứng dụng các hệ truyền dẫn động này. Hệ điều khiển được xác định theo chu kỳ, theo vị trí hoặc theo chu tuyến v.v... Trong chương VI sẽ đề cập đến các hệ điều khiển ứng dụng trong robot công nghiệp.

Sai số định vị của bàn kẹp Δ (mm) là độ sai lệch giữa vị trí thực so với vị trí yêu cầu. Mức chính xác thấp (Δ > ± 1,0mm) áp dụng cho các loại robot vận chuyển, phun phủ v.v... Mức chính xác trung bình (0,1mm ≤ Δ ≤ 1,0mm) thích hợp với các việc như lắp ráp có khe hở, vặn vít, hàn hồ quang v.v... Mức chính xác cao (Δ < 0,1mm) dùng khi đo lường, lắp ráp khít v.v...

Bảng 2.1. *Đặc trưng của robot.*

Thông số kỹ thuật	*Giá trị*
Số bậc tự do	-
Tải năng	kg
Giá trị giới hạn (max, min)	
* Biến khớp quay	rad
* Biến khớp tịnh tiến	mm
Vận tốc góc lớn nhất khi quay	rad/s
Vận tốc tịnh tiến lớn nhất	mm/s
Tầm với (max / min)	mm
Tầm cao (max / min)	mm
Sai số định vị	± mm
Hệ truyền dẫn động	-
Hệ điều khiển	-

2.6. PHÂN LOẠI ROBOT CÔNG NGHIỆP

Ngày nay robot công nghiệp đã phát triển rất đa dạng. Có thể phân loại robot công nghiệp theo nhiều cách khác nhau:

- Theo vị trí "công tác" phân ra các loại robot cấp thoát phôi, robot vận chuyển, robot vạn năng v.v...

- Theo dạng công nghệ chuyên dụng phân ra các loại robot sơn, robot hàn, robot lắp ráp v.v...

- Theo cách thức và đặc trưng điều khiển phân ra: robot điều khiển tự động, robot điều khiển bằng dạy học, robot điều khiển bằng tay, robot nhìn được (vision) v...v.

- Theo các hệ toạ độ được dùng khi thực hiện các chuyển động cơ bản phân ra các robot hoạt động theo hệ toạ độ trụ, cầu hoặc phỏng sinh v... v.

Bảng 2.2 thống kê các loại hình robot công nghiệp chủ yếu.

Bảng 2.2. *Robot công nghiệp*

Các loại Robot	Không gian thao tác
Tọa độ vuông góc	Hình hộp
Tọa độ trụ	Hình trụ
Tọa độ cầu	Hình cầu
Tay máy phỏng sinh trục ngang	Hình cầu
Tay máy phỏng sinh trục đứng	Hình trụ
Tay máy con lắc	Một phần hình cầu
Tay máy phỏng Sinh n bậc tự do	Hình cầu

CHƯƠNG III

CÁC PHÉP BIẾN ĐỔI DÙNG MA TRẬN THUẦN NHẤT

3.1. BIẾN ĐỔI TOẠ ĐỘ DÙNG MA TRẬN

3.1.1. Vectơ điểm và toạ độ thuần nhất.

Vectơ điểm (point vector) dùng để mô tả vị trí của điểm trong không gian 3 chiều.

Trong không gian 3 chiều, một điểm M có thể được biểu diễn bằng nhiều véctơ trong các hệ toạ độ (coordimate frame) khác nhau:

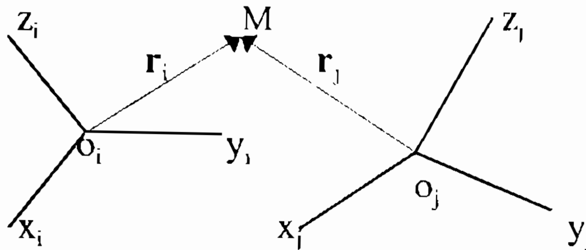
Trong hệ toạ độ $o_i\ x_i\ y_i\ z_i$ điểm M được xác định bằng vectơ $\mathbf{r}_i$:

$$\mathbf{r}_i = (r_{xi}, r_{yi}, r_{zi})^T \qquad (3.1)$$

và cùng điểm M đó trong hệ toạ độ $o_j\ x_j\ y_j\ z_j$ được mô tả bằng vectơ $\mathbf{r}_j$:

$$\mathbf{r}_j = (r_{xj}, r_{yj}, r_{zj})^T \qquad (3.2)$$

Ký hiệu $(\ )^T$ là biểu thị phép chuyển vị (Transportation) vectơ hàng thành vectơ cột .



Hình 3.1. *Biểu diễn 1 điểm trong không gian*

Ở đây, cũng như về sau đều dùng các hệ toạ độ thuận, tức là, các hệ toạ độ chọn theo qui tắc bàn tay phải: nếu chọn ngón tay cái chỉ phương, chiều của trục z, thì ngón tay trỏ chỉ phương, chiều của trục x và ngón tay giữa sẽ biểu thị phương, chiều của trục y.

Véctơ $\mathbf{r} = (r_x, r_y, r_z)^T$ trong không gian 3 chiều, nếu được bổ sung thêm một thành phần thứ 4 và thể hiện bằng một vectơ mở rộng:

$$\tilde{r} = (\omega r_x, \omega r_y, \omega r_z, \omega)^T . \qquad (3.3)$$

Thì đó là cách biểu diễn vectơ điểm trong không gian toạ độ thuần nhất (homogeneous coordinate).

Dưới đây để đơn giản hoá, ở những chỗ không gây nhầm lẫn, có thể bỏ qua ký hiệu (~) đối với vectơ mở rộng (3.3)

Các toạ độ thực của véctơ mở rộng này vẫn là:

$$r_x = \frac{\omega r_x}{\omega} \qquad r_y = \frac{\omega r_y}{\omega} \qquad r_z = \frac{\omega r_z}{\omega} \qquad (3.4)$$

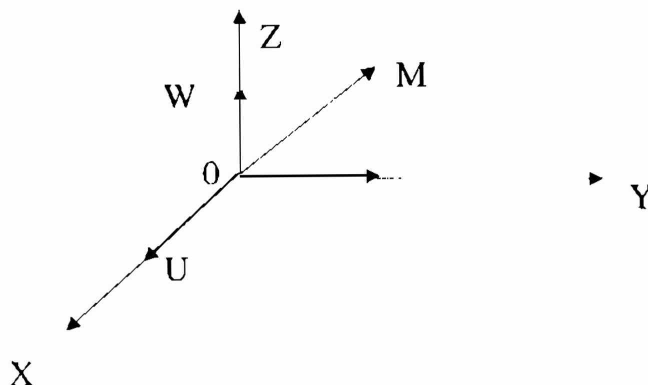
Không phải duy nhất có một cách biểu diễn véctơ trong không gian toạ độ thuần nhất, mà nó phụ thuộc vào giá trị của ω. Nếu lấy $\omega = 1$ thì các toạ độ biểu diễn bằng toạ độ có thực. Trong trường hợp này véctơ mở rộng được viết là:

$$\mathbf{r} = (r_x, r_y, r_z, 1)^T \qquad (3.5)$$

Nếu lấy $\omega \neq 1$ thì các toạ độ biểu diễn gấp ω lần toạ độ thực, nên có thể gọi ω là *hệ số tỷ lệ*. Khi cần biểu diễn sự thay đổi toạ độ kèm theo có sự biến dạng tỷ lệ thì dùng $\omega \neq 1$.

3.1.2. Quay hệ toạ độ dùng ma trận 3× 3

Trước hết thiết lập quan hệ giữa 2 hệ toạ độ XYZ và UVW chuyển động quay tương đối với nhau khi gốc O của 2 hệ vẫn trùng nhau (hình 3.2).



Hình 3.2. *Các hệ toạ độ.*

Gọi ($\mathbf{i}_x$, $\mathbf{i}_y$, $\mathbf{i}_z$) và ($\mathbf{i}_u$, $\mathbf{i}_v$, $\mathbf{i}_w$) là các vectơ đơn vị chỉ phương các trục OXYZ và OUVW tương ứng.

Một điểm M nào đó được biểu diễn trong hệ toạ độ OXYZ bằng vectơ:

$$\mathbf{r}_{xyz} = (r_x , r_y , r_z)^T \tag{3.6}$$

còn trong hệ toạ độ OUVW bằng vectơ:

$$\mathbf{r}_{uvw} = (r_u , r_v , r_w)^T \tag{3.7}$$

Như vậy:

$$\left.\begin{aligned} \mathbf{r} = \mathbf{r}_{uvw} &= r_u\mathbf{i}_u + r_v\mathbf{j}_v + r_w\mathbf{k}_w \\ \mathbf{r} = \mathbf{r}_{xyz} &= r_x\mathbf{i}_x + r_y\mathbf{j}_y + r_z\mathbf{k}_z \end{aligned}\right\} \tag{3.8}$$

Từ đó ta có

$$\left.\begin{aligned} r_x = \mathbf{i}_x.\mathbf{r} &= \mathbf{i}_x\mathbf{i}_u r_u + \mathbf{i}_x\mathbf{j}_v r_v + \mathbf{i}_x\mathbf{k}_w r_w \\ r_y = \mathbf{j}_y.\mathbf{r} &= \mathbf{j}_y\mathbf{i}_u r_u + \mathbf{j}_y\mathbf{j}_v r_v + \mathbf{j}_x\mathbf{k}_w r_w \\ r_z = \mathbf{k}_z.\mathbf{r} &= \mathbf{k}_z\mathbf{i}_u r_u + \mathbf{k}_z\mathbf{j}_v r_v + \mathbf{k}_z\mathbf{k}_w r_w \end{aligned}\right\} \tag{3.9}$$

Hoặc viết dưới dạng ma trận:

$$\begin{bmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{i}_x\mathbf{i}_u & \mathbf{i}_x\mathbf{j}_v & \mathbf{i}_x\mathbf{k}_w \\ \mathbf{j}_y\mathbf{i}_u & \mathbf{j}_y\mathbf{j}_v & \mathbf{j}_y\mathbf{k}_w \\ \mathbf{k}_z\mathbf{i}_u & \mathbf{k}_z\mathbf{j}_v & \mathbf{k}_z\mathbf{k}_w \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} r_u \\ r_v \\ r_w \end{bmatrix} \tag{3.10}$$

Gọi R là ma trận quay (rotation) 3×3 với các phần tử là tích vô hướng 2 vectơ chỉ phương các trục tương ứng của 2 hệ toạ độ OXYZ và OUVW.

Vậy (3.10) được viết lại là:

$$\left.\begin{aligned} \mathbf{r}_{xyz} &= R.\mathbf{r}_{uvw} \\ \mathbf{r}_{uvw} &= R^{-1}.\ \mathbf{r}_{xyz} \end{aligned}\right\} \tag{3.11}$$

Có thể biểu diễn các phần tử ma trận R và R^{-1} như sau:

$$R = [[a_{ij}]] = \begin{bmatrix} \cos(x,u) & \cos(x,v) & \cos(x,w) \\ \cos(y,u) & \cos(y,v) & \cos(y,w) \\ \cos(z,u) & \cos(z,v) & \cos(z,w) \end{bmatrix} \tag{3.12}$$

$$R^{-1} = [[b_{ij}]] = \begin{bmatrix} \cos(u,x) & \cos(u,y) & \cos(u,z) \\ \cos(v,x) & \cos(v,y) & \cos(v,z) \\ \cos(w,x) & \cos(w,y & \cos(w,z) \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Chú ý đến quan hệ giữa 2 cặp trục, ví dụ, cos (x,u) = cos (u,x) v.v... dễ dàng nhận thấy.

$$R^{-1} = R^{T} \quad (3.14)$$

Ký hiệu $(\ )^{-1}$ là biểu thị ma trận nghịch đảo

và $(\ )^{T}$ là ma trận chuyển vị (Transported)

3.1.3 Biến đổi ma trận dùng toạ độ thuần nhất.

Bây giờ thiết lập quan hệ giữa 2 hệ toạ độ: hệ toạ độ $o_jx_jy_jz_j$ sang hệ toạ độ mới $o_ix_iy_iz_i$. Chúng không những quay tương đối với nhau mà tịnh tiến cả gốc toạ độ: gốc o_j xác định trong hệ $x_iy_iz_i$ bằng véctơ **p**:

$$\mathbf{p} = (a,-b,-c,1)^{T} \quad (3.15)$$

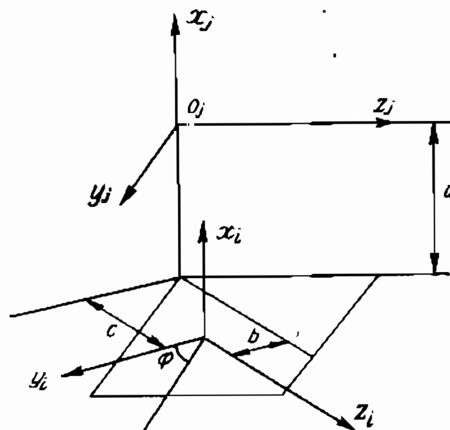
Giả sử vị trí của điểm M trong hệ tọa độ $x_jy_jz_j$ được xác định bằng véctơ $\mathbf{r}_j$:

$$\mathbf{r}_j = (x_jy_jz_j,1)^{T} \quad (3.16)$$

và trong hệ toạ độ $x_iy_iz_i$ điểm M được xác định bằng véctơ $\mathbf{r}_i$:

$$\mathbf{r}_i = (x_iy_iz_i,1)^{T} \quad (3.17)$$

Từ hình 3.3 có thể dễ dàng thiết lập mối quan hệ giữa các toạ độ:



Hình 3.3. *Các hệ toạ độ*

$$\left.\begin{aligned} x_i &= x_j + a\,t_j \\ y_i &= y_j\cos\varphi - z_j\sin\varphi - bt_j \\ z_i &= y_j\sin\varphi + z_j\cos\varphi - ct_j \\ t_i &= t_j = 1 \end{aligned}\right\} \qquad (3.18)$$

Sắp xếp các hệ số ứng với x_j, y_j, z_j và t_j thành một ma trận:

$$T_{ij} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & \cos\varphi & -\sin\varphi & -b \\ 0 & \sin\varphi & \cos\varphi & -c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (3.19)$$

và viết phương trình biến đổi toạ độ như sau:

$$\mathbf{r}_i = T_{ij}\mathbf{r}_j \qquad (3.20)$$

Ma trận T_{ij} biểu thị bằng ma trận 4 × 4 như phương trình (3.19) và gọi là ma trận thuần nhất.

Các vectơ (3.15), (3.16), (3.17) là những vectơ mở rộng biểu diễn trong không gian toạ độ thuần nhất. Có thể viết cụ thể lại (3.20) hoặc (3.18) như sau:

$$\begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & \cos\varphi & -\sin\varphi & -b \\ 0 & \sin\varphi & \cos\varphi & -c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_j \\ y_j \\ z_j \\ 1 \end{pmatrix} \qquad (3.21)$$

Như vậy ma trận thuần nhất 4 × 4 dùng để biến đổi véctơ mở rộng từ hệ toạ độ thuần nhất này sang hệ toạ độ thuần nhất kia.

Ứng dụng ma trận thuần nhất trong phép biến đổi toạ độ tỏ ra có nhiều ưu điểm, bởi vì trong ma trận 4 × 4 bao gồm cả thông tin về sự quay và cả về dịch chuyển tịnh tiến.

Phương trình (3.20) mô tả sự biến đổi từ hệ toạ độ cũ $o_j\, x_j\, y_j\, z_j$ sang hệ toạ độ mới $o_i\, x_i\, y_i\, z_i$. Khi cần biến đổi ngược lại ta có.

$$\mathbf{r}_j = T_{ji}\,\mathbf{r}_i \qquad (3.22)$$

với $$T_{ji} = T_{ij}^{-1} \qquad (3.23)$$

Ma trận nghịch đảo T_{ij}^{-1} được tính từ T_{ij} theo công thức (3.24):

$$T_{ji} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -a \\ 0 & \cos\varphi & \sin\varphi & b\cos\varphi + c\sin\varphi \\ 0 & -\sin\varphi & \cos\varphi & -b\sin\varphi + c\cos\varphi \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.24)$$

Có thể thiết lập công thức này theo cách sẽ trình bày ở phần sau, khi suy diễn công thức (3.33) hoặc (3.34).

3.1.4. Ý nghĩa hình học của ma trận thuần nhất

Từ (3.19) nhận thấy ma trận thuần nhất 4×4 là một ma trận gồm 4 khối:

$$T_{ij} = \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & \cos\varphi & -\sin\varphi & -b \\ 0 & \sin\varphi & \cos\varphi & -c \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array}\right) \quad (3.25)$$

Hoặc viết rút gọn là:

$$T_{ij} = \left(\begin{array}{c|c} R_{ij} & \mathbf{p} \\ \hline 0 & 1 \end{array}\right) \quad (3.26)$$

Trong đó:

R_{ij} - ma trận quay 3×3

p - ma trận 3×1 biểu thị 3 toạ độ của điểm gốc hệ toạ độ o_j trong hệ toạ độ $o_i\, x_i\, y_i\, z_i$

1×3 - ma trận không

1×1 - ma trận đơn vị

Như vậy ma trận thuần nhất 4×4 là ma trận 3×3 mở rộng, thêm ma trận 3×1 biểu thị sự chuyển dịch gốc toạ độ và phần tử a_{44} biểu thị hệ số tỷ lệ.

Dễ dàng nhận thấy ma trận R_{ij} chính là ma trận quay 3×3, nếu suy từ ma trận quay trong (3.10) sang trường hợp hình 3.3 ta có:

$$R_{ij} = [\, a_{ij} \,] = \begin{pmatrix} \cos(x_i, x_j) & \cos(x_i, y_j) & \cos(x_i, z_j) \\ \cos(y_i, x_j) & \cos(y_i, y_j) & \cos(y_i, z_j) \\ \cos(z_i, x_j) & \cos(z_i, y_j) & \cos(z_i, z_j) \end{pmatrix} \quad (3.27)$$

và các góc cosin chỉ phương này đều liên hệ đến góc φ (hình3.3).

Nếu chú ý về quan hệ giữa 2 cặp trục, ví dụ, $\cos(x_i\, y_j) = \cos(y_j\, x_i)$ v... v. ở đây dễ dàng nhận được biểu thức tương tự (3.14):

$$R_{ji} = R_{ij}^{-1} = R_{ij}^{T} \quad (3.28)$$

Mô tả tổng quát hơn nếu một điểm M nào đó được xác định trong hệ toạ độ thuần nhất UVW bằng véctơ mở rộng $\mathbf{r}_{uvw}$, thì trong hệ toạ độ thuần nhất XYZ điểm đó được xác định bằng vectơ mở rộng $\mathbf{r}_{xyz}$:

$$\mathbf{r}_{xyz} = T\, \mathbf{r}_{uvw} \quad (3.29)$$

Trong đó T là ma trận thuần nhất 4x4, có thể viết khai triển ở dạng sau:

$$T = \left(\begin{array}{ccc|c} n_x & s_x & a_x & p_x \\ n_y & s_y & a_y & p_y \\ n_z & s_z & a_z & p_z \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array}\right) \quad (3.30)$$

hoặc

$$T = \left(\begin{array}{c|c} R & \mathbf{p} \\ \hline 0 & 1 \end{array}\right) \quad (3.31)$$

Ta tìm hiểu ý nghĩa hình học của ma trận T. Như đã trình bày khi phân tích các khối của ma trận 4×4, ma trận 3×1 tương ứng với toạ độ điểm gốc của hệ toạ độ UVW biểu diễn trong hệ XYZ.

Nếu 2 gốc toạ độ trùng nhau thì các thành phần của ma trận 3×1 này đều là 0. Khi đó xét trường hợp:

$$\mathbf{r}_{uvw} = (1, 0, 0, 1)^T$$

tức là
$$\mathbf{r}_{xyz} = \mathbf{i}_u$$

thì dễ dàng nhận thấy cột thứ nhất hoặc véctơ **n** của ma trận (3.30) chính là các toạ độ của véctơ chỉ phương trục OU biểu diễn trong hệ toạ độ XYZ.

Tương tự khi xét các trường hợp

$$\mathbf{r}_{uvw} = (0, 1, 0, 1)^T$$

và
$$\mathbf{r}_{uvw} = (0, 0, 1, 1)^T$$

cũng đi đến nhận xét cột thứ 2 (hoặc véctơ **s**) ứng với các toạ độ của vectơ chỉ phương trục OV và cột thứ 3 (hoặc véctơ **a**) ứng với các toạ độ vectơ chỉ phương trục OW.

Như vậy, *ma trận thuần nhất T 4×4 hoàn toàn xác định vị trí và định hướng của hệ toạ độ UVW so với hệ toạ độ XYZ*. Đó là ý nghĩa hình học thứ nhất của ma trận thuần nhất 4×4.

Ma trận nghịch đảo T^{-1} có thể xác định theo các cách sau đây:

Gọi tổng quát các phần tử ma trận T và T^{-1} là $[a_{ij}]$ và $[b_{ij}]$ tương ứng, với i = j = 1÷ 4 và chú ý rằng từ (3.14) đối với ma trận quay bậc 3×3 đã có $R^{-1} = R^T$. Do vậy có thể viết khai triển phương trình $T^{-1}.T = I$ (ma trận đơn vị) như sau:

$$\left\{\begin{bmatrix} a_{11} & a_{21} & a_{31} & 0 \\ a_{12} & a_{22} & a_{32} & 0 \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & b_{14} \\ 0 & 0 & 0 & b_{24} \\ 0 & 0 & 0 & b_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}\right\}\left\{\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & a_{14} \\ 0 & 0 & 0 & a_{24} \\ 0 & 0 & 0 & a_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}\right\} = 1$$

Sau khi biến đổi ta có:

$$\left.\begin{aligned} b_{14} &= -(a_{11}a_{14} + a_{21}a_{24} + a_{31}a_{34}) \\ b_{24} &= -(a_{12}a_{14} + a_{22}a_{24} + a_{32}a_{34}) \\ b_{34} &= -(a_{13}a_{14} + a_{23}a_{24} + a_{33}a_{34}) \end{aligned}\right\} \qquad (3.32)$$

Từ đó dễ dàng thiết lập các công thức sau đây để tính ma trận nghịch đảo T^{-1}

$$T^{-1} = \left(\begin{array}{c|c} R^{-1} & -R^{T}\mathbf{p} \\ \hline 0 & 1 \end{array}\right) \qquad (3.33)$$

$$T^{-1} = \left(\begin{array}{c|c} R^{T} & -R^{T}\mathbf{p} \\ \hline 0 & 1 \end{array}\right) \qquad (3.34)$$

$$T^{-1} = \left(\begin{array}{c|c} & -\mathbf{p}.\mathbf{n} \\ R^{T} & -\mathbf{p}.\mathbf{s} \\ & -\mathbf{p}.\mathbf{a} \\ \hline 0 & 1 \end{array}\right) \qquad (3.35)$$

Trong đó các tích vô hướng véctơ :

$$\left.\begin{aligned} \mathbf{p}.\mathbf{n} &= p_x n_x + p_y n_y + p_z n_z \\ \mathbf{p}.\mathbf{s} &= p_x s_x + p_y s_y + p_z s_z \\ \mathbf{p}.\mathbf{a} &= p_x a_x + p_y a_y + p_z a_z \end{aligned}\right\} \qquad (3.36)$$

Như vậy trong ma trận nghịch đảo T^{-1} thì các cột 1,2,3 tương ứng với các toạ độ của véctơ chỉ phương các trục OX, OY và OZ biểu thị trong hệ toạ độ UVW. Còn 3 thành phần đầu của cột thứ 4 ứng với các

toạ độ của điểm gốc XYZ trong hệ toạ độ UVW. Ý nghĩa hình học đó cũng có nhiều ứng dụng thực tế.

Ngoài ra, từ (3.36), có thể thấy, nếu phương trục nào đó (ví dụ, OU) của UVW thẳng góc với véctơ **p**, thì phần tử tương ứng (ví dụ, phần tử đầu) của cột thứ 4 sẽ bằng 0. Trường hợp tất cả 3 phần tử của cột thứ 4 bằng 0 là lúc 2 gốc toạ độ trùng nhau.

Trong các phần tử sau khi sử dụng ma trận thuần nhất 4×4 sẽ khai thác thêm các ý nghĩa hình học tiếp theo của nó.

3.2. TÓM TẮT NỘI DUNG CƠ BẢN VỀ MA TRẬN.

3.2.1. Các định nghĩa.

Ma trận A bậc m x n là một bảng số:

$$A = [a_{ij}] = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix}$$

$i = 1,2, \dots, m$

$j = 1,2, \dots, n$

a_{ij} - các phần tử của ma trận

m - dòng

n - cột

Khi m = 1 → ma trận 1 dòng

n = 1 → ma trận 1 cột

Ma trận 1 dòng hoặc ma trận 1 cột thường dùng để biểu thị vectơ.

Ma trận chuyển vị của ma trận A là ma trận A^T (T - transported : chuyển vị), đã chuyển vị trí của cột thành hàng và ngược lại.

$$A^T = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{21} & \dots & a_{m1} \\ a_{12} & a_{22} & \dots & a_{m2} \\ . & . & . & . \\ . & . & . & . \\ . & . & . & . \\ a_{1n} & a_{2n} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix}$$

$i = 1,2, \dots, n$; $j = 1,2, \dots, m$

Vậy ma trận chuyển vị của ma trận 1 dòng là ma trận 1 cột và ngược lại.

Ma trận vuông (bậc n) khi $m = n$.

Ma trận đường chéo (bậc n):

$a_{ij} = 0$ khi $i \neq j$, $i,j = 1,2,\dots, n$

Ma trận đơn vị (bậc n), ký hiệu là I (Indentity Matrix)

$a_{ij} = 0$ khi $i \neq j$, $i,j = 1,2,\dots, n$

$a_{ij} = 1$ khi $i = j$, $i,j = 1,2,\dots, n$

Ma trận đối xứng vuông (bậc n):

$$A = A^T$$

tức là $a_{ij} = -a_{ji}$ với mọi i và j

Ma trận đối xứng chéo vuông (bậc n):

$$A = -A^T$$

tức là $a_{ij} = - a_{ji}$ và $a_{ij} = 0$ $i,j = 1,2,\dots,n$

Một ma trận không đối xứng A bất kỳ có thể biến thành ma trận đối xứng bằng cách:

$$C = (A + A^T)/ 2$$

Ma trận không 0: $a_{ij} \equiv 0$

Ma trận bằng nhau: $A = B$

tức là $a_{ij} = b_{ij}$ với mọi i và j.

3.2.2. Phép cộng, trừ ma trận:

Cộng (trừ) các ma trận A và B cùng bậc sẽ có ma trận C cùng bậc với các phần tử c_{ij} là tổng (hiệu) các phần tử a_{ij} và b_{ij} với mọi i, j:

$A + B = C$ tức là $a_{ij} + b_{ij} = c_{ij}$

$A - B = C$ tức là $a_{ij} - b_{ij} = c_{ij}$

Phép cộng ma trận có đầy đủ các tính chất của phép cộng số thực:

1) A + B = B + A

2) (A + B) + C = A + (B + C)

3) A + 0 = A

4) A + (- A) = 0

3.2.3. Phép nhân ma trận:

Nhân một số (vô hướng) k với ma trận A:

$k.A = A.k = [\, ka_{ij}] = [a_{ij}k]$
$i = 1,2,\ldots, m$
$j = 1,2,\ldots, n$

Phép nhân ma trận (bậc bất kỳ m x n) với số vô hướng a hoặc b tuân theo các qui tắc sau:

1) a. (A + B) = a.A + a.B

2) (a + b). A = a.A + b.A

3) a (bA) = (ab) A

4) I.A =A

Hai ma trận có thể nhân với nhau *chỉ khi* số cột của ma trận này bằng số dòng của ma trận kia:

$$(A_{m\times n})\,(B_{n\times p}) = C_{m\times}$$

$$c_{ij} = \sum_{k=1}^{n} a_{ik} b_{kj}$$

Qui tắc "nhân dòng với cột" có thể phát biểu như sau:

Để xác định phần tử c_{ij} của ma trận C = A.B cần tìm tổng của tích các phần tử trên dòng thứ i của ma trận A nhân tương ứng với các phần tử trên cột thứ j của ma trận B.

Sơ đồ dưới đây minh họa cho qui tắc "nhân dòng với cột ":

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & b_{34} \\ b_{41} & b_{42} & b_{43} & b_{44} \end{bmatrix}$$

$$C = A.B = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} \\ c_{31} & \boxed{c_{32}} & c_{33} & c_{34} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} \end{bmatrix}$$

$$c_{32} = a_{31}b_{12} + a_{32}b_{22} + a_{33}b_{32} + a_{34}b_{42}$$

Phép nhân ma trận không có tính giao hoán (commutability):

$$A.B \neq B.A$$

Ma trận đơn vị giao hoán được với bất kỳ ma trận vuông nào:

$$I.A = A.I = A$$

Phép nhân ma trận tuân theo các qui tắc sau:

1) (k.A).B = k.(A.B) = A.(k.B)

2) A.(B.C) = (A.B) .C

3) (A+B).C = A.C + B.C

4) C.(A+B) = C.A + C.B

3.2.4. Định thức của ma trận (determinant of a matrix)

Định thức của ma trận A bậc n x n, viết là:

$$|A| = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{1n} & a_{2n} & a_{3n} & a_{4n} \end{vmatrix} \quad \text{hoặc det A}$$

và bằng tổng của tích các phần tử nhân với phần phụ đại số tương ứng:

$$|A| = \sum_{j=1}^{n} a_{ij} A_{ij} = \sum_{i=1}^{m} a_{ij} A_{ij}$$

với A_{ij} - phần phụ đại số tương ứng với phần tử a_{ij}.

$$A_{ij} = (-1)^{i+j} M_{ij}$$

với M_{ij} là định thức con (minor) nhận từ định thức $|A|$ bằng cách bỏ các phần tử trên dòng thứ i và cột thứ j.

$$
\left|M_{ij}\right| = \begin{vmatrix}
a_{11} & a_{12}\cdots & a_{ij-1} & a_{ij+1}\cdots & a_{1n} \\
\vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
a_{i-1,1} & a_{i-1,2}\cdots & a_{i+1,j+1} & a_{i-1,j+1}\cdots & a_{i-1,n} \\
a_{i+1,1} & a_{i+1,2}\cdots & a_{i+1,j+1} & a_{i+1,j+1}\cdots & a_{i+1,n} \\
\vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
a_{n1} & a_{n2}\cdots & a_{nj-1} & a_{nj+1} & a_{nn}
\end{vmatrix}
$$

Như vậy, định thức bậc n phụ thuộc vào n định thức bậc n-1; mỗi định thức này lại phụ thuộc vào n-1 định thức bậc n-2 và cứ thế đến định thức bậc 1 (là một số vô hướng).

Đối với các định thức bậc 2 và bậc 3 có thể dùng phương pháp đường chéo đơn giản.

Ví dụ, với định thức bậc 2:

$$
| A | = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} = a_{11}a_{22} - a_{21}a_{12}
$$

với định thức bậc 3:

$$
| A | = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} = a_{11}a_{22}a_{33} + a_{12}a_{23}a_{31} +
$$

$$
+ a_{13}a_{32}a_{21} - a_{31}a_{22}a_{13} - a_{12}a_{21}a_{33} - a_{11}a_{32}a_{23}
$$

Để đơn giản việc tính các định thức người ta dùng các tính chất, ví dụ như:

1. Nếu tất cả các phần tử trên một dòng (hay cột) bất kỳ của ma trận A mà đều bằng 0 thì $| A| = 0$.

2. $| A| = | A^T|$

3. Nếu 2 dòng hay cột bất kỳ của ma trận A mà đổi vị trí cho nhau thì sẽ thay đổi dấu của định thức.

4. Nếu các ma trận A và B đều là bậc n thì $| AB| = | A| . | B|$.

5. Nếu tất cả các phần tử của dòng (hay cột) bất kỳ của ma trận A đều được nhân với một số vô hướng k thì giá trị của định thức sẽ tăng lên gấp k lần.

Nhận xét: Cũng tương tự như định thức, ma trận có các phần tử xếp thành dòng và cột, nhưng không tính ra bằng một số như định thức. Chỉ có ma trận vuông mới có định thức.

3.2.5. "Rang" của ma trận.

Nếu bỏ bớt trong ma trận A một số dòng và một số cột sao cho số dòng và số cột còn lại bằng nhau thì phần còn lại là định thức con (minor) của ma trận A. Một ma trận có thể có nhiều định thức con (minor). Trong số đó có các định thức con bằng không. Số bậc cao nhất của định thức con được gọi là "Rang" của ma trận.

Rang của ma trận mxn, với $m \neq n$, sẽ không vượt quá số nhỏ trong 2 số m và n.

Dùng khái niệm Rang có thể xác định điều kiện cần đủ để hệ phương trình tuyến tính có số phương trình bằng số nghiệm, là: *Rang của ma trận hệ số bằng Rang của ma trận hệ số mở rộng.*

3.2.6. Vết của ma trận (Tr - Trace).

Vết của ma trận vuông bậc n là tổng các phần tử trên đường chéo:

$$Tr(A) = \sum_{i=1}^{n} a_{ii}$$

Một số tính chất quan trọng của vết ma trận:

1) $Tr(A) = Tr(A^T)$

2) $Tr(A+B) = Tr(A) + Tr(B)$

3) $Tr(A.B) = Tr(B.A)$

4) $Tr(ABC^T) = Tr(CB^TA^T)$

3.2.7. Ma trận nghịch đảo.

Ma trận nghịch đảo của ma trận A dược ký hiệu là A^{-1} thoả mãn phương trình sau:

$$A^{-1}A = A\,A^{-1} = I$$

Từ đó ta có:

$$\det A.\det(A^{-1}) = \det I = 1$$

vậy

$$\det(A^{-1}) = 1/\det A$$

Rõ ràng phải có điều kiện: $\det A \neq 0$.

Ma trận có định thức bằng không gọi là *ma trận suy biến*. Ma trận suy biến không có ma trận nghịch đảo và các ma trận không suy biến đều có ma trận nghịch đảo.

Như đã ký hiệu A_{ij} là phần phụ đại số ứng với phần tử a_{ij} của ma trận A. Dễ dàng kiểm nghiệm biểu thức sau:

$$A^{-1} = \frac{1}{\det A}.[A_{ij}]$$

$[A_{ij}]$ - ma trận với các phần tử A_{ij}.

Các tính chất:

$$(A_1A_2 \dots A_n)^{-1} = A_n^{-1}A_{n-1}^{-1} \dots A_2^{-1}A_1^{-1}$$

$$(A_1A_2 \dots A_n)^{T} = A_n^{T}A_{n-1}^{T} \dots A_2^{T}A_1^{T}$$

$$(A^{-1})^T A^T = (AA^{-1})^T = I \quad \text{do đó } (A^{-1})^T = (A^T)^{-1}$$

$$(A^{-1} + B^T CB)^{-1} = A - AB^T(BAB^T + C^{-1})^{-1} BA.$$

Một số công thức sẵn:

1. Trường hợp 2x2:

$$A = \begin{bmatrix} a & c \\ b & d \end{bmatrix} \rightarrow A^{-1} = \frac{1}{ad - bc}\begin{bmatrix} d & -c \\ -b & a \end{bmatrix}$$

2. Trường hợp 3x3:

$$A = \begin{bmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & i \end{bmatrix} \rightarrow A^{-1} = \frac{1}{aei + dhc + gfb - afh - dbi - gec} \times$$

$$\times \begin{bmatrix} (ei - fh) & -(bi - ch) & (bf - ce) \\ -(di - fg) & (ai - cg) & -(af - cd \\ (dh - ge) & -(ah - bg) & (ae - bd) \end{bmatrix}$$

3.2.8. Vi phân và tích phân ma trận.

Nếu các phần tử của ma trận A là các hàm (ví dụ của thời gian t) vi phân được, thì tồn tại đạo hàm của ma trận. Đó là ma trận với các phần tử mới nhận được bằng vi phân các phần tử của ma trận A.

Cũng có các công thức sau (A,B là ma trận cùng bậc; X là ma trận không phụ thuộc t)

$$\frac{d}{dt}(AB) = AB + AB$$

$$\frac{d}{dt}(AX) = \frac{dA}{dt}X$$

Tương tự, phép tích phân ma trận cho một ma trận:

$$\int A(t)dt = \{\int a_{ij}(t)dt\}$$

và cũng tuân theo các qui tắc:

1) $\int (A+B)dt = \int Adt + \int Bdt$

2) $\int AXdt = (\int Adt)X$

3.3. CÁC PHÉP BIẾN ĐỔI CƠ BẢN

3.3.1. Phép biến đổi tịnh tiến

Từ (3.19) hoặc (3.30), biểu thị ma trận thuần nhất, khi chỉ có biến đổi tịnh tiến mà không có quay ($\varphi = 0$), ta có:

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & p_x \\ 0 & 1 & 0 & p_y \\ 0 & 0 & 1 & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = T_p(p_x, p_y, p_z) \qquad (3.37)$$

Đó là ma trận biến đổi tịnh tiến (Translation).

Gọi **u** là vectơ biểu diễn một điểm (trong không gian) cần dịch chuyển tịnh tiến:

$$\mathbf{u} = (x, y, z)^T$$

và **p** là vectơ chỉ hướng và độ dài cần dịch chuyển:

$$\mathbf{p} = (p_x, p_y, p_z)^T$$

thì **v** là vectơ biểu diễn điểm toạ độ trong không gian đã được tịnh tiến tới:

$$\mathbf{v} = T_p(p_x, p_y, p_z)\,\mathbf{u} \tag{3.38}$$

Ví dụ: Cho biết $\mathbf{u} = (2, 3, 2)^T$

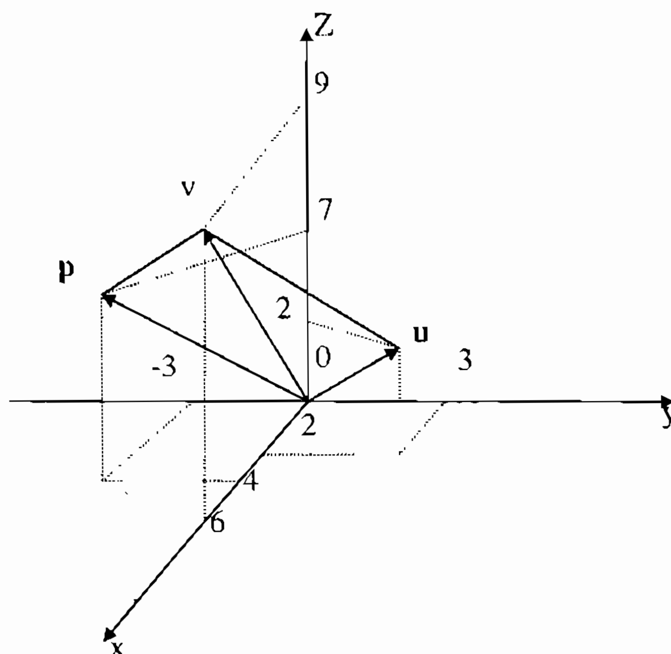
$\mathbf{p} = (4, -3, 7)^T$

cần xác định **v**.

Giải:

Theo (3.38) ta có:

$$\mathbf{v} = T_p(p_x, p_y, p_z)\mathbf{u} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 4 \\ 0 & 1 & 0 & -3 \\ 0 & 0 & 1 & 7 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 2 \\ 3 \\ 2 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 6 \\ 0 \\ 9 \\ 1 \end{bmatrix}$$



Hình 3.4. *Phép biến đổi tịnh tiến trong không gian*

3.3.2. Phép quay quanh các trục toạ độ .

Từ ma trận quay 3x3 trong biểu thức (3.10) ta xây dựng ma trận R (x, α) cho trường hợp hệ toạ độ UVW quay quanh trục OX một góc α nào đó. Trong trường hợp này $\mathbf{i}_x = \mathbf{i}_u$

$$R(x,\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

Tương ứng cho trường hợp quay quanh trục OY một góc φ:

$$R(y,\varphi) = \begin{bmatrix} \cos\varphi & 0 & \sin\varphi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\varphi & 0 & \cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

và trường hợp quay quanh trục OZ một góc θ:

$$R(z,\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

Cột thứ 4 của các ma trận 4x4 trên có 3 phần tử đầu đều bằng 0 vì ở đây không có sự tịnh tiến. Các ma trận này được gọi là các ma trận quay (rotation) cơ bản. Các ma trận quay khác có thể xây dựng từ các ma trận cơ bản này.

Ví dụ: Cho điểm U biểu diễn bằng vectơ **u**:

$\mathbf{u} = (7\ ,\ 3\ ,\ 2)^T$

$$V = R(z,90)U = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 7 \\ 3 \\ 2 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -3 \\ 7 \\ 2 \\ 1 \end{bmatrix}$$

quay quanh trục Z một góc 90^0 (hình3.5) để tới điểm V xác định bằng vectơ **v**.

Giải: Nếu cho điểm V tiếp tục quay quanh trục y một góc 90^0 tới điểm W, xác định bằng véctơ **w.**

$$W = R(y,90)V = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -3 \\ 7 \\ 2 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \\ 7 \\ 3 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Có thể biểu diễn:

$$\mathbf{w} = R\,(y, 90).\ R\,(z, 90)\ \mathbf{u} = (\,2, 7, 3, 1)^T$$

Chú ý: Nếu đổi thứ tự quay sẽ được w ≠ w.

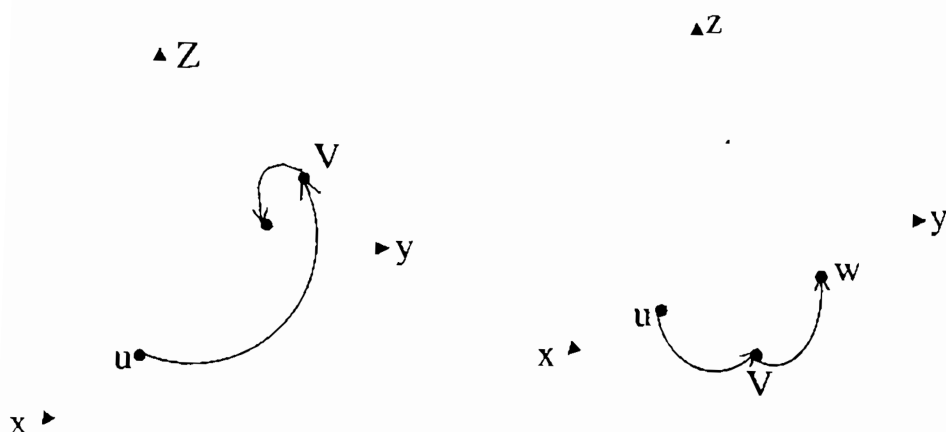
Rõ ràng là: R (y, 90). R (z, 90) **u** ≠ R (z, 90). R (y, 90) **u.**

Thật vậy, như chỉ rõ trên hình 3.6, cho U quay quanh trục y trước một góc 90^0, ta có:

$$\mathbf{v}' = R(y,90)\mathbf{u} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 7 \\ 3 \\ 2 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \\ 3 \\ -7 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Sau đó cho **v'** quay quanh trục z một góc 90^0, ta có:

$$\mathbf{w}' = R(z,90).R(y,90)\mathbf{u} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2 \\ 3 \\ -7 \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -3 \\ 2 \\ -7 \\ 1 \end{bmatrix}$$



Hình 3.5. $w = R(y,90^0).\ R(z,90^0)u$ **Hình 3.6.** $w' = R(z,90^0).\ R(y,90^0)u$

3.3.3. Phép quay phức hợp.

Hệ toạ độ OUVW gắn với một vật thể nào đó được quay tương đối so với hệ toạ độ cố định OXYZ và có thể hợp thành từ 3 chuyển động quay liên tiếp quanh 3 trục OX, OY, OZ với góc quay tương ứng là α, θ, φ.

Ba phép quay cơ bản này được biểu thị bằng các ma trận (3.39), (3.40), (3.41) tương ứng. Vậy ma trận biểu thị sự quay phức hợp này là tích của các ma trận quay cơ bản nói trên. Cần lưu ý rằng phép nhân ma trận không có tính giao hoán nên trình tự các phép quay cơ bản phải được đảm bảo.

Ví dụ: Nếu quay theo thứ tự thực hiện góc quay α, θ rồi φ sẽ có:

$$R(\varphi, \theta, \alpha) = R(y, \varphi)\, R(z, \theta)\, R(x, \alpha) \qquad (3.42)$$

thay (3.39) ÷ (3.41) vào (3.42) ta có:

$$R(\varphi,\theta,\alpha) = \begin{bmatrix} C_\varphi C_\theta & S_\varphi S_\alpha - C_\varphi S_\theta C_\alpha & C_\varphi S_\theta S_\alpha - S_\varphi C_\alpha & 0 \\ S_\theta & C_\theta C_\alpha & -C_\theta S_\alpha & 0 \\ -S_\varphi C_\theta & C_\varphi S_\theta C_\alpha + C_\varphi S_\alpha & C_\varphi C_\alpha - S_\varphi S_\theta C_\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (3.43)$$

Ở đây cũng như về sau dùng cách viết tắt ví dụ:

$$C_\varphi = \cos\varphi \quad , S_\varphi = \sin\varphi , \quad \text{v...v.}$$

Nếu trình tự các phép quay cơ bản thay đổi đi: quay φ quanh OY, quay θ quanh OZ rồi quay α quanh OX, ta lại có

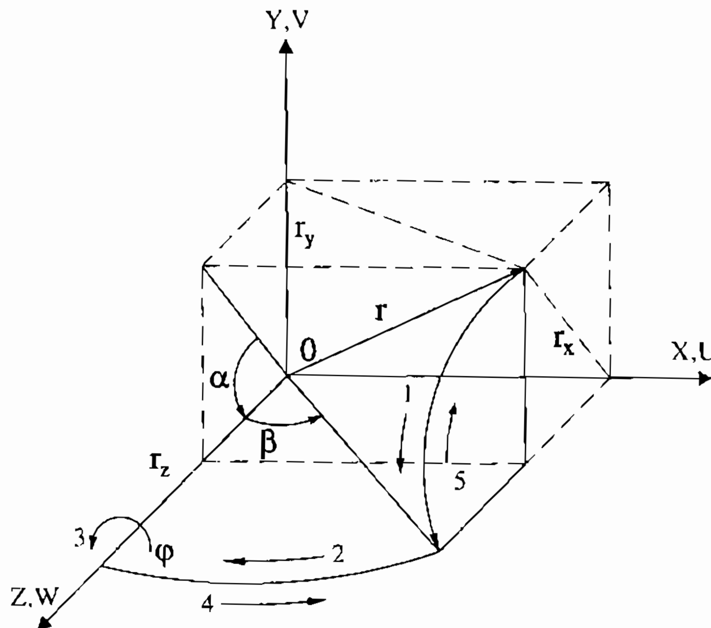
$$R\quad(\alpha, \theta, \varphi) = R\,(x, \alpha).\, R\,(z, \theta).\, R\,(y, \varphi) \tag{3.44}$$

$$R(\alpha,\theta,\varphi)=\begin{bmatrix} C_\theta C_\varphi & -S_\theta & C_\theta S_\varphi & 0 \\ C_\alpha S_\alpha C_\varphi + S_\alpha S_\varphi & C_\alpha C_\theta & C_\alpha S_\theta S_\varphi - S_\alpha C_\varphi & 0 \\ S_\alpha S_\theta C_\varphi - C_\alpha S_\varphi & S_\alpha C_\theta & S_\alpha S_\theta S_\varphi - C_\alpha C_\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.45}$$

3.3.4. Phép quay quanh trục bất kỳ.

Trong nhiều trường hợp tọa độ động OUVW gắn liền với vật thể nào đó có thể quay góc φ quanh một trục bất kỳ nào đó cắt qua gốc O, đặc trưng bằng vectơ đơn vị chỉ phương:

$$\mathbf{r} = (\,r_x\,,\,r_y\,,\,r_z\,)^T \tag{3.46}$$



Hình 3.7. *Phép quay quanh trục bất kỳ*

Để xây dựng ma trận R(r, φ) biểu thị sự quay của vật thể quanh trục quay r, có thể thực hiện qua các bước sau (hình 3.7):

- Quay góc α quanh OX, để trục r sẽ nằm xuống mặt phẳng XZ.

- Quay góc -β quanh OY, để trục r (đang nằm trên mặt phẳng XZ) sẽ trùng với trục OZ.

- Quay góc φ quanh trục r (đang trùng với OZ).

- Quay ngược lại qua bước quay +β quanh trục OY.

- Quay -α quanh OX để đưa trục r về vị trí xuất phát.

Vậy ma trận R(r, φ) sẽ có dạng sau:

$$R(r, \varphi) = R(x, -\alpha).\ R(y, \beta).\ R(z, \varphi).\ R(y, -\beta).\ R(x, \alpha) \qquad (3.47)$$

với:

$$R(x,-\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_\alpha & S_\alpha & 0 \\ 0 & -S_\alpha & C_\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R(y,\beta) = \begin{bmatrix} C_\beta & 0 & S_\beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -S_\beta & 0 & C_\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad R(z,\varphi) = \begin{bmatrix} C_\varphi & -S_\varphi & 0 & 0 \\ S_\varphi & C_\varphi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R(y,-\beta) = \begin{bmatrix} C_\beta & 0 & -S_\beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ S_\beta & 0 & C_\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} ; R(x,\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_\alpha & -S_\alpha & 0 \\ 0 & S_\alpha & C_\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Từ hình 3.7 ta có:

$\sin\alpha = r_y / (r_y^2 + r_z^2)^{1/2}$ $\qquad \cos\alpha = r_z / (r_y^2 + r_z^2)^{1/2}$

$\sin\beta = r_x$ $\qquad \cos\beta = (r_y^2 + r_z^2)^{1/2}$

và gọi: $V_\varphi = \text{vers}\ \varphi = 1 - \cos\varphi$, (versin φ)

ta có:

$$R_{r,\varphi} = \begin{bmatrix} r_x^2 V_\varphi + C_\varphi & r_x r_y V_\varphi - r_z S_\varphi & r_x r_z V_\varphi + r_y S_\varphi & 0 \\ r_x r_y V_\varphi + r_z S_\varphi & r_y^2 V_\varphi + C_\varphi & r_y r_z V_\varphi - r_x S_\varphi & 0 \\ r_x r_z V_\varphi - r_y S_\varphi & r_y r_z V_\varphi + r_x S_\varphi & r_z^2 V_\varphi + C_\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.48)$$

Ví dụ: Xác định ma trận quay R(r, φ) quay góc φ quanh trục r:

$\mathbf{r} = (1, 1, 1)^T$

Giải: ở đây vectơ **r** không phải là véctơ đơn vị nên các hình chiếu xác định như sau:

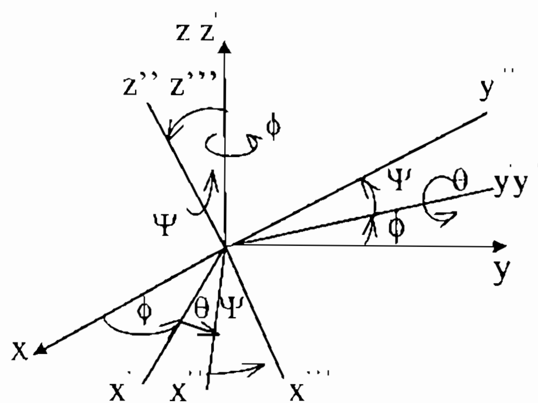
$$r_x = \frac{1}{\sqrt{3}} \qquad r_y = \frac{1}{\sqrt{3}} \qquad r_z = \frac{1}{\sqrt{3}}$$

thay chúng vào (3.48) ta có:

$$R(r,\varphi) = \begin{bmatrix} \frac{1}{3}V_\varphi + C_\varphi & \frac{1}{3}V_\varphi - \frac{1}{\sqrt{3}}S_\varphi & \frac{1}{3}V_\varphi + \frac{1}{\sqrt{3}}S_\varphi & 0 \\ \frac{1}{3}V_\varphi + \frac{1}{\sqrt{3}}C\varphi & \frac{1}{3}V_\varphi + C_\varphi & \frac{1}{3}V_\varphi - \frac{1}{\sqrt{3}}S_\varphi & 0 \\ \frac{1}{3}V_\varphi - \frac{1}{\sqrt{3}}S\varphi & \frac{1}{3}V_\varphi + \frac{1}{\sqrt{3}}S_\varphi & \frac{1}{3}V_\varphi + C_\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

3.3.5. Phép quay theo 3 góc Euler.

Ta biểu thị sự quay của vật thể thông qua các góc Euler. Có nhiều cách định hướng bằng 3 góc Euler. Dưới đây là cách thường dùng nhất (hình 3.8):



Hình 3.8. *Phép quay theo 3 góc Euler*

1) Quay góc ϕ quanh trục z.

2) Quay tiếp góc θ quanh trục y mới, đó là y'.

3) Quay tiếp góc Ψ quanh trục z mới, đó là z'' và ma trận biểu diễn phép quay theo 3 góc Euler, gọi tắt là phép quay Euler nhận được bằng cách nhân 3 ma trận quay với nhau. Ở phép quay Euler nếu thực hiện thứ tự quay ngược lại (ψ→θ→ϕ) cũng cho kết quả như nhau:

$$R(\phi,\theta,\Psi) = R(z,\phi).R(y,\theta).R(z,\Psi) \quad (3.49)$$

Với:
$$R(z,\phi) = \begin{bmatrix} C_\phi & -S_\phi & 0 & 0 \\ S_\phi & C_\phi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R(y,\theta) = \begin{bmatrix} C_\theta & 0 & S_\theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -S_\theta & 0 & C_\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R(z,\psi) = \begin{bmatrix} C_\psi & -S_\psi & 0 & 0 \\ S_\psi & C_\psi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Thay vào (3.49) ta có:

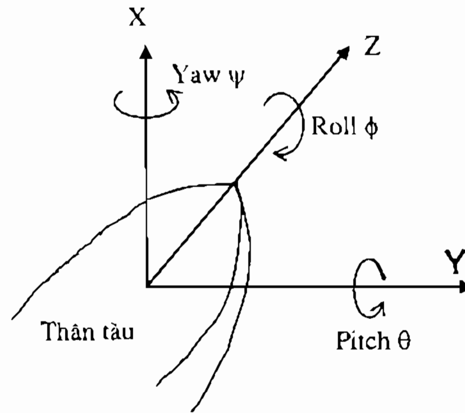
$$R(\phi,\theta,\psi) = \begin{bmatrix} C_\phi C_\theta C_\psi - S_\phi S_\psi & -C_\phi C_\theta S_\psi - S_\phi C_\psi & C_\phi S_\theta & 0 \\ S_\phi C_\theta C_\psi + C_\phi S_\psi & -S_\phi C_\theta S_\psi + C_\phi C_\psi & S_\phi S_\theta & 0 \\ -S_\theta C_\psi & S_\theta S_\psi & C_\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.50)$$

3.3.6. Phép quay Roll - Pitch - Yaw (RPY)

Một phép quay khác cũng thường được sử dụng là phép quay Roll, Pitch và Yaw, gọi tắt là phép quay RPY.

Hãy tưởng tượng, gắn hệ toạ độ xyz lên thân một con tầu. Dọc theo thân tầu là trục z (hình 3.9):

Roll là chuyển động lắc của thân tàu, tương đương với việc quay thân tàu một góc ϕ quanh trục z.



Hình 3.9. *Phép quay Roll - Pitch - Yaw*

Pitch là sự bồng bềnh, tương đương với góc quay θ quanh trục y.

Yaw là sự lệch hướng, tương đương với phép quay một góc Ψ quanh trục x.

Xác định thứ tự quay: quay một góc Ψ quanh trục x, tiếp theo là quay một góc θ quanh trục y va sau đó là quay một góc ϕ quanh trục z.

Theo thứ tự quay đó có thể biểu diễn phép quay RPY như sau:

$$RPY(\phi, \theta, \Psi) = R(z, \phi).\ R(y, \theta).\ R(x, \Psi) \quad (3.51)$$

với:

$$R(z,\phi) = \begin{bmatrix} C_\phi & -S_\phi & 0 & 0 \\ S_\phi & C_\phi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R(y,\theta) = \begin{bmatrix} C_\theta & 0 & S_\theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -S_\theta & 0 & C_\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R(x,\psi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_\psi & -S_\psi & 0 \\ 0 & S_\psi & C_\psi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Thay vào (3.51) ta có:

$$RPY(\phi,\theta,\psi) = \begin{bmatrix} C_\phi C_\theta & C_\phi S_\theta S_\psi - S_\phi C_\psi & C_\phi S_\theta C_\psi + S_\phi S_\psi & 0 \\ S_\phi C_\theta & S_\phi S_\theta S_\psi + C_\phi C_\psi & S_\phi S_\theta C_\psi - C_\phi S_\psi & 0 \\ -S_\theta & C_\theta S_\psi & C_\theta C_\psi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.52)$$

3.4. CÁC BÀI TOÁN BIẾN ĐỔI NGƯỢC.

3.4.1. Xác định góc quay và trục quay.

Trên đây chúng ta đã nghiên cứu các bài toán thuận, nghĩa là chỉ định trục quay r và góc quay φ trước rồi tìm kết quả biến đổi theo các phép quay đã chỉ định đó.

Bây giờ, ngược lại với bài toán trên, giả sử đã biết sau phép biến đổi nào đó kết quả là vật thể đang ở trạng thái cuối hoàn toàn xác định, vấn đề là phải tìm ngược lại xem các thông số biến đổi đó là gì, cụ thể là tìm trục quay k và góc quay θ khi biến đổi.

Thông thường trạng thái cuối của vật thể có thể mô tả bằng ma trận T_E, gọi là ma trận trạng thái cuối. Giả sử ma trận T_E được xác định như sau:

$$T_E = \begin{bmatrix} u_x & v_x & w_x & p_x \\ u_y & v_y & w_y & p_y \\ u_z & v_z & w_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.53)$$

Như đã phân tích ở mục 3.1.4, mỗi cột của ma trận quay 3x3 trong T_E là một véctơ đơn vị chỉ phương một trục của hệ toạ độ động UVW, biểu diễn trong hệ toạ độ cố định XYZ. Hệ toạ độ động UVW gắn liền với vật thể đang xét.

Mặt khác do các phép biến đổi quay góc θ nào đó quanh một trục k với ma trận quay (3.48) đã đưa vật thể đến trạng thái cuối, được mô tả bằng (3.53). Như vậy, ta có:

$$T_E = \begin{bmatrix} u_x & v_x & w_x & p_x \\ u_y & v_y & w_y & p_y \\ u_z & v_z & w_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} r_x^2 V_\varphi + C_\varphi & r_x r_y V_\varphi - r_z S_\varphi & r_x r_z V_\varphi + r_y S_\varphi & 0 \\ r_x r_y V_\varphi + r_z S_\varphi & r_y^2 V_\varphi + C_\varphi & r_y r_z V_\varphi - r_x S_\varphi & 0 \\ r_x r_z V_\varphi - r_y S_\varphi & r_y r_z V_\varphi + r_x S_\varphi & r_z^2 V_\varphi + C_\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.54}$$

So sánh các phần tử tương đương của 2 ma trận (3.54), có thể xác định được các quan hệ cần thiết. Trước hết dễ dàng nhận ra $p_x = p_y = p_z = 0$, và ở đây ứng với trường hợp gốc của hệ toạ độ UVW không rời khỏi gốc của hệ toạ độ XYZ.

Cộng đường chéo của 2 ma trận (3.54) ở hai vế ta có:

$$u_x + v_y + w_z + 1 = r_x^2 V_\varphi + C_\varphi + r_y^2 V_\varphi + C_\varphi + r_z^2 V_\varphi + C_\varphi + 1$$

$$= (1 - C_\varphi)(r_x^2 + r_y^2 + r_z^2) + 3C_\varphi + 1$$

$$= 2(1 + C_\varphi)$$

Vậy: $$C_\varphi = \cos\varphi = \frac{1}{2}(u_x + v_y + w_z - 1) \tag{3.55}$$

Tính hiệu các phần tử tương đương của 2 ma trận, chẳng hạn:

$$\left.\begin{aligned} v_z - w_y &= 2r_x S_\varphi \\ w_x - u_z &= 2r_y S_\varphi \\ u_y - v_x &= 2r_z S_\varphi \end{aligned}\right\} \tag{3.56}$$

Bình phương 2 vế của các phương trình trên rồi cộng lại ta có:

$$(v_z - w_y)^2 + (w_x - u_z)^2 + (u_y - v_x)^2 = 4S_\varphi^2$$

vậy:

$$S_\varphi = \sin\varphi = \pm\frac{1}{2}\sqrt{(v_z - w_y)^2 + (w_x - u_z)^2 + (u_y - v_x)^2} \quad (3.57)$$

Từ (3.55) và (3.57) với $0 \le \varphi \le 180^0$ ta có:

$$tg\varphi = \frac{\sqrt{(v_z - w_y)^2 + (w_x - u_z)^2 + (u_y - v_x)^2}}{u_x + v_y + w_z - 1} \quad (3.58)$$

Từ (3.56) xác định trục quay **r**:

$$r_x = \frac{v_z - w_y}{2\sin\varphi}, r_y = \frac{w_x - u_z}{2\sin\varphi}, r_z = \frac{u_y - v_x}{2\sin\varphi} \quad (3.59)$$

Theo các công thức này thì khi $\varphi = 0^0$ hoặc 180^0 sẽ không xác định được trục quay **r**, nên tìm cách tính khác.

Xét phần tử tương đương của 2 ma trận (3.53) và (3.54):

$$u_x = r_x^2 V_\varphi + C_\varphi$$
$$v_y = r_y^2 V_\varphi + C_\varphi$$
$$w_z = r_z^2 V_\varphi + C_\varphi$$

Từ đây suy ra:

$$r_x = \pm\sqrt{\frac{u_x - C_\varphi}{V_\varphi}} = \pm\sqrt{\frac{u_x - \cos\varphi}{1 - \cos\varphi}}$$

$$r_y = \pm\sqrt{\frac{v_y - C_\varphi}{V_\varphi}} = \pm\sqrt{\frac{v_y - \cos\varphi}{1 - \cos\varphi}}$$

$$r_z = \pm\sqrt{\frac{w_z - C_\varphi}{V_\varphi}} = \pm\sqrt{\frac{w_z - \cos\varphi}{1 - \cos\varphi}}$$

Vì trong khoảng $0^0 \le \varphi \le 180^0$ thì $\sin\varphi$ luôn luôn dương và theo (3.56) có thể thấy r_x, r_y, r_z luôn luôn cùng dấu với vế trái, nên có thể viết:

Hàm Sgn(x) dùng để biểu diễn quan hệ "cùng dấu với x".

$$\left.\begin{aligned} r_x &= \mathrm{Sgn}(v_x - w_y)\sqrt{\frac{u_x - \cos\varphi}{1-\cos\varphi}} \\ r_y &= \mathrm{Sgn}(w_x - u_z)\sqrt{\frac{v_y - \cos\varphi}{1-\cos\varphi}} \\ r_z &= \mathrm{Sgn}(u_y - v_x)\sqrt{\frac{w_z - \cos\varphi}{1-\cos\varphi}} \end{aligned}\right\} \qquad (3.60)$$

Có thể xác định các thành phần của trục quay **r** theo cách dùng phương pháp cộng các cặp còn lại của các phần tử đối xứng qua đường chéo các ma trận (3.54):

$$\left.\begin{aligned} u_y + v_x &= 2r_x r_y V_\varphi = 2r_x r_y(1-\cos\varphi) \\ v_z + w_y &= 2r_y r_z V_\varphi = 2r_y r_z(1-\cos\varphi) \\ w_x + u_z &= 2r_z r_x V_\varphi = 2r_z r_x(1-\cos\varphi) \end{aligned}\right\} \qquad (3.61)$$

Thuận tiện hơn nếu chọn từ (3.60) thành phần có trị lớn nhất, ví dụ r_x, rồi tính các thành phần còn lại theo (3.61):

$$r_y = \frac{u_y + v_x}{2r_x(1-\cos\varphi)}$$

$$r_z = \frac{w_x + u_z}{2r_x(1-\cos\varphi)}$$

Ví dụ: Cho R(r, φ) = R(y, 90°). R(z, 90°). Hãy xác định trục quay **r** và góc quay φ để:

$$R(r,\varphi) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Giải: Từ (3.55):

$$\cos\varphi = \frac{1}{2}(u_x + v_y + w_z - 1) = \frac{1}{2}(0+0+0-1) = -\frac{1}{2}$$

Từ (3.57):

$$\sin\varphi = \frac{1}{2}\sqrt{(v_z - w_y)^2 + (w_x - u_z)^2 + (u_y - v_x)^2} =$$

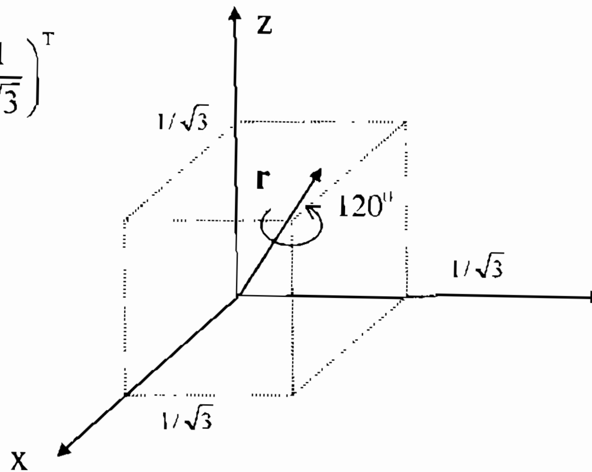
$$= \frac{1}{2}\sqrt{(1-0)^2 + (1-0)^2 + (1-0)^2} = \frac{\sqrt{3}}{2}$$

Theo (3.60):

$$r_x = r_y = r_z = +\sqrt{\frac{0 + 1/2}{1 + 1/2}} = \frac{1}{\sqrt{3}}$$

Vậy:

$$r = \left(\frac{1}{\sqrt{3}} \;.\; \frac{1}{\sqrt{3}} \;,\; \frac{1}{\sqrt{3}}\right)^T$$



Hình 3.10.
*Tìm trục quay **r** và góc quay φ*

3.4.2. Xác định 3 góc Euler

Trong phần 3.3.5 đã biểu thị sự quay của một vật thể thông qua các góc ϕ, θ và Ψ. Ở đây là bài toán ngược lại, khi đã biết trạng thái cuối của vật thể là kết quả của phép quay đó, vấn đề là từ đó xác định lại các góc quay này.

Cũng như phần trên có thể mô tả trạng thái cuối của vật thể bằng ma trận T_E (3.53) và như vậy ta có:

$$R(\phi,\theta,\psi) = R(z,\phi).\quad R(y,\theta).\quad R(z,\psi) = \quad T_E \qquad (3.62)$$

Trong đó R(ϕ, θ, Ψ) xác định bằng công thức (3.50).

Lần lượt cho cân bằng các phần tử tương ứng của 2 ma trận trong phương trình (3.62) ta có các biểu thức sau:

$$u_x = C_\phi C_\theta C_\psi - S_\phi S_\psi \quad (3.63)$$

$$u_y = C_\phi C_\theta C_\psi + C_\phi S_\psi \quad (3.64)$$

$$u_z = -S_\theta C_\psi \quad (3.65)$$

$$v_x = -C_\phi C_\theta C_\psi - S_\phi S_\psi \quad (3.66)$$

$$v_y = -S_\phi C_\theta S_\psi + C_\phi S_\psi \quad (3.67)$$

$$v_z = S_\theta S_\psi \quad (3.68)$$

$$w_z = C_\phi S_\theta \quad (3.69)$$

$$w_y = S_\phi S_\theta \quad (3.70)$$

$$w_z = C_\theta \quad (3.71)$$

Từ hệ các phương trình này xác định ϕ, θ, Ψ như sau:

Từ (3.71) ta có :

$$\theta = \arccos w_z = \cos^{-1} w_z \quad (3.72)$$

Từ (3.69) ta có:

$$\phi = \cos^{-1}\left(\frac{w_x}{\sin\theta}\right) \quad (3.73)$$

Từ (3.65) và (3.72) ta có:

$$\psi = \cos^{-1}\left(-\frac{u_z}{\sin\theta}\right) \quad (3.74)$$

Các lời giải từ (3.72) đến (3.74) chưa dùng được, bởi vì tính đa trị của hàm lượng giác arccos và bởi vì có hàm số sin θ ở mẫu số, cho nên sẽ không xác định khi $\theta = 0^0$ hoặc $\theta = 75 \pm 180^0$.

Người ta thường dùng hàm arctg2(y,x), gọi là hàm arctg2 biến hoặc vắn tắt hơn là hàm arctg2, với mục đích xác định được góc thực duy nhất với dấu của tỷ thức y/x. Hàm số trả về giá trị góc trong khoảng $-\pi \le \theta \le \pi$ bằng cách xét dấu của y và x (hình 3.11) .

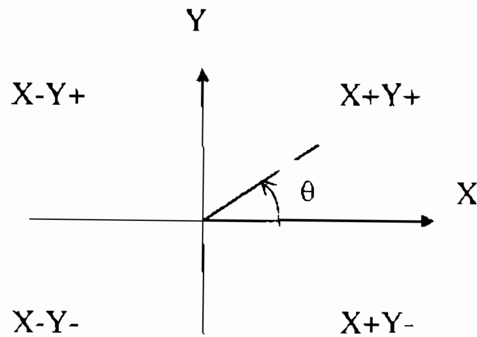
Ví dụ:

arctg2 (-1/-1) = -135^0

còn arctg2 (1/1) = 45^0

Trong một số ngôn ngữ lập trình hiện đại, hàm arctg2 đã có sẵn trong thư viện.

Bởi vậy cần thực hiện thủ thuật toán học sau: nhân 2 vế của phương trình (3.62) với ma trận nghịch đảo $R(z,\phi)^{-1}$ ta có:



Hình 3.11. *Hàm arctg2 (y,x)*

$$R\,(z,\phi)^{-1}\,T_E = R\,(y,\theta).\,R\,(z,\Psi) \qquad (3.75)$$

Vế trái của phương trình (3.75) là một hàm của các phần tử ma trận T_E và góc quay ϕ. Thực hiện phép nhân ma trận ở vế phải của (3.75), tìm ra các phần tử của ma trận có giá trị bằng 0 hoặc bằng hằng số, cho các phần tử này cân bằng với những phần tử tương ứng của ma trận ở vế trái. Cụ thể từ (3.75) ta có:

$$\begin{bmatrix} C_\phi & S_\phi & 0 & 0 \\ -S_\phi & C_\phi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_x & v_x & w_x & p_x \\ u_y & v_y & w_y & p_y \\ u_z & v_z & w_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} C_\theta C_\psi & -C_\theta S_\psi & S_\theta & 0 \\ S_\psi & C_\psi & 0 & 0 \\ -S_\theta C_\psi & S_\theta S_\psi & C_\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (3.76)$$

Nhân 2 ma trận ở vế trái của phương trình (3.76) và chú ý rằng p_x, p_y, p_z bằng 0 vì phép biến đổi Euler chỉ toàn phép quay, không chứa một phép tịnh tiến nào, ta có ma trận sau:

$$\begin{bmatrix} C_\phi u_x + S_\phi u_y & C_\phi v_x + S_\phi v_y & C_\phi w_x + S_\phi w_y & 0 \\ -S_\phi u_x + C_\phi u_y & -S_\phi v_x + C_\phi v_y & -S_\phi w_x + C_\phi w_y & 0 \\ u_z & v_z & w_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.77)$$

Cân bằng ma trận (3.77) và ma trận ở vế phải của (3.76), cho 2 phần tử ở hàng 2 cột 3 bằng nhau, ta có:

$$-S_\phi w_x + C_\phi w_y = 0 \quad (3.78)$$

từ đó:

$$tg\phi = \frac{S\phi}{C\phi} = \frac{\sin\phi}{\cos\phi} = \frac{w_y}{w_x}$$

vậy góc ϕ có thể xác định bằng hàm arctg2 biến:

$$\phi = \text{arctg } 2\,(w_y, w_x)$$

Từ (3.78) ta cũng nhận được: $tg\phi = \dfrac{\sin\phi}{\cos\phi} = \dfrac{-w_y}{-w_x}$

vậy trong trường hợp này: $\phi = \text{arctg } 2\,(-w_y, -w_x)$

Như vậy phương trình (3.78) có một cặp nghiệm cách nhau 180^0, khi lập trình máy tính thường viết: $\phi = \phi + 180^0$

Nếu cả w_x và w_y đều bằng 0 thì góc ϕ không xác định được, đó là trường hợp suy biến và ta lấy $\phi = 0$.

Tiếp tục so sánh các phần tử của 2 ma trận nói trên ta có:

$$C_\phi w_x + S_\phi w_y = S_\theta$$

và $w_z = C_\theta$

Từ đó: $\theta = arctg2(C_\phi w_x + S_\phi w_y, w_z)$

Tiếp theo ta có:

$$-S_\phi u_x + C_\phi u_y = S_\psi$$

$$-S_\phi v_x + C_\phi v_y = C_\psi$$

Vậy:

$$\Psi = \text{arctg } 2\ (-\,S_\phi u_x + C_\phi\, u_y,\ -\,S_\phi v_x + C_\phi\, v_y)$$

Tóm lại 3 góc Euler, lời giải bài toán ngược, được xác định bằng các công thức sau:

$$\phi = \text{arctg } 2\ (a_y,\ a_x) \tag{3.79}$$

$$\theta = \text{arctg } 2\ (C_\phi w_x + S_\phi w_y,\ w_z) \tag{3.80}$$

$$\Psi = \text{arctg } 2\ (-S_\phi u_x + C_\phi u_y,\ -\,S_\phi v_x + C_\phi\, v_y) \tag{3.81}$$

3.4.3. Xác định 3 góc RPY

Phép biến đổi Roll - Pitch - Yaw (RPY) đã được mô tả ở phần 3.3.6. Kết quả của phép biến đổi đó là vật thể đạt tới trạng thái cuối, mô tả bằng ma trận T_E (3.53) và như vậy ta có:

$$\text{RPY}\ (\phi,\theta,\Psi) = R\ (z,\phi).\ R\ (y,\theta).\ R\ (x,\Psi) = T_E \tag{3.82}$$

Cách giải bài toán ngược này, để tìm các nghiệm ϕ,θ,Ψ từ phương trình (3.82), được tiến hành tương tự như khi thực hiện lời giải cho phép quay Euler ở phần trên.

Nhân hai vế của (3.82) với ma trận nghịch đảo $R(z,\phi)^{-1}$, ta có:

$$R\ (z,\phi)^{-1}\ T_E = R\ (y,\theta).\ R\ (x,\Psi) \tag{3.83}$$

Sau các phép nhân ma trận, ta có:

$$\left.\begin{aligned}
&\begin{bmatrix} C_\phi u_x + S_\phi u_y & C_\phi v_x + S_\phi v_y & C_\phi w_x + S_\phi w_y & 0 \\ -S_\phi u_x + C_\phi u_y & -S_\phi v_x + C_\phi v_y & -S_\phi w_x + C_\phi w_y & 0 \\ u_z & v_z & w_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \\
&= \begin{bmatrix} C_\theta & C_\theta S_\psi & S_\theta C_\psi & 0 \\ 0 & C_\psi & -S_\psi & 0 \\ -S_\theta & C_\theta S_\psi & C_\theta C_\psi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
\end{aligned}\right\} \tag{3.84}$$

Cân bằng 2 phần tử ở hàng 2 cột 1, ta có:

$$-\,S_\phi\, u_x + C_\phi\, u_y = 0$$

Phương trình này cho 2 nghiệm, như đã biết:

$$\phi = \text{arctg } 2\ (u_x,\ u_y)$$

và $\phi = \phi + 180^0$

Tiếp tục cân bằng các phần tử tương ứng của 2 ma trận trong phương trình (3.84), ta có:

$$- S_{\theta} = u_{z}$$

$$C_{\theta} = C_{\phi}u_{x} + S_{\phi}u_{y}$$

do vậy:

$$\theta = \text{arctg } 2\ (-u_{z},\ C_{\phi}u_{x} + S_{\phi}u_{y})$$

Ngoài ra, ta có:

$$- S_{\psi} = - S_{\phi}\ w_{x} + C_{\phi}\ w_{y}$$

$$C_{\psi} = - S_{\phi}\ v_{x} + C_{\phi}\ v_{y}$$

do vậy:

$$\psi = \text{arctg } 2\ (S_{\phi}\ w_{x} - C_{\phi}\ w_{y},\ - S_{\phi}\ v_{x} + C_{\phi}\ v_{y})$$

Như vậy ta đã xác định được các góc Roll, Pitch và Yaw theo các phần tử của ma trận T_E bằng các công thức sau:

$$\phi = \text{arctg } 2\ (u_{x},\ u_{y}) \qquad (3.85)$$

$$\theta = \text{arctg } 2\ (-u_{z},\ C_{\phi}u_{x} + S_{\phi}u_{y}) \qquad (3.86)$$

$$\psi = \text{arctg } 2\ (S_{\phi}\ w_{x} - C_{\phi}w_{y},\ - S_{\phi}v_{x} + C_{\phi}v_{y}) \qquad (3.87)$$

CHƯƠNG IV

HỆ PHƯƠNG TRÌNH ĐỘNG HỌC ROBOT

4.1. ĐẶT VẤN ĐỀ.

Cơ cấu chấp hành của robot thường là một cơ cấu hở, gồm một chuỗi các khâu (links) nối với nhau bằng các khớp (joints). Các khớp động này là khớp quay (R) hoặc khớp tịnh tiến (T). Để robot có thể thao tác linh hoạt, cơ cấu chấp hành của nó phải cấu tạo sao cho điểm mút của khâu cuối cùng đảm bảo dễ dàng di chuyển theo một quĩ đạo nào đó, đồng thời khâu này có một định hướng nhất định theo yêu cầu. Khâu cuối cùng thường là bàn kẹp (gripper) hoặc là khâu gắn liền với dụng cụ làm việc (tools). Điểm mút của khâu cuối cùng là điểm đáng quan tâm nhất vì đó là điểm tác động của robot lên đối tác và được gọi là "điểm tác động cuối" (end - effector). Chính ở điểm này cần quan tâm không những vị trí nó chiếm trong không gian, mà cả hướng tác động của khâu cuối đó.

Gắn vào "điểm tác động cuối" này một hệ toạ độ động thứ n và gắn với mỗi khâu động một hệ toạ độ động khác, còn gắn liền giá đỡ với hệ tọa độ cố định. Đánh số ký hiệu các hệ này từ o đến n bắt đầu từ giá cố định. Khi khảo sát chuyển động của robot cần biết "định vị và định hướng" tại điểm tác động cuối trong mọi thời điểm. Nhiều khi lại cần biết cả vận tốc và gia tốc chuyển động của robot tại điểm tác động cuối đó cũng như tại các điểm khác trên robot. Đó là nội dung quan trọng của bài toán về động học robot. Các lời giải của bài toán này được xác định từ những phương trình động học của robot. Các phương trình này là mô hình động học của robot. Chúng được xây dựng trên cơ sở thiết lập các mối quan hệ giữa các hệ toạ độ động nói trên so với hệ toạ độ cố định.

4.2. XÁC ĐỊNH TRẠNG THÁI CỦA ROBOT TẠI " ĐIỂM TÁC ĐỘNG CUỐI"

Như trên đã nhấn mạnh tại các " điểm tác động cuối" của robot không những cần biết vị trí của điểm mút của khâu cuối cùng, tức là điểm tác động của robot lên đối tác, mà còn phải xác định hướng tác động của khâu cuối cùng đó.

Như vậy trạng thái của robot tại " điểm tác động cuối" hoàn toàn xác định bằng sự định vị và định hướng tại điểm tác động cuối đó.

Như đã đề cập ở phần 3.1.4, biểu thị sự định vị và định hướng đó bằng ma trận trạng thái cuối T_E. Ma trận này được viết lại như sau:

$$T_E = \begin{bmatrix} u_x & v_x & w_x & p_x \\ u_y & v_y & w_y & p_y \\ u_z & v_z & w_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (4.1)$$

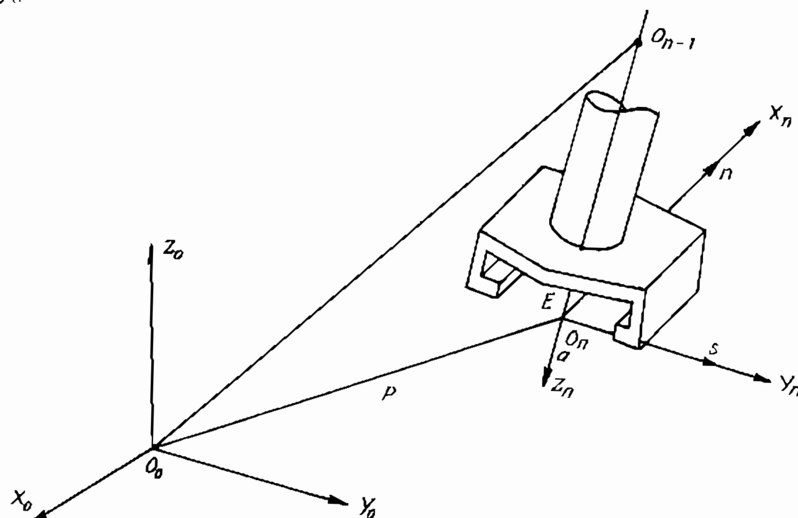
Trong đó các phần tư của ma trận 3x1 là toạ độ p_x, p_y, p_z của " điểm tác động cuối" (E); Mỗi cột của ma trận quay 3x3 là một véctơ đơn vị chỉ phương một trục của hệ toạ độ động UVW biểu diễn trong toạ độ cố định XYZ.

Hệ toạ độ động UVW gắn liền với khâu cuối cùng và có gốc là " điểm tác động cuối". Nếu theo ký hiệu các hệ toạ độ được xác định đánh số từ o đến n thì thay thế UVW bằng x_n y_n z_n tương ứng.

Trong nhiều tài liệu kỹ thuật của nước ngoài dùng cả ký hiệu hệ toạ độ này là **n, s, a.** Các ký hiệu hệ toạ độ này là hoàn toàn tương ứng với nhau và được dùng tuỳ nơi để thích hợp với tính hệ thống khi diễn đạt ở nơi đó:

$$U,V,W \sim x_n, y_n, z_n \sim \mathbf{n, s, a}$$

Trên hình 4.1 biểu thị các hệ toạ độ này, so với hệ toạ độ cố định x_o, y_o.



Hình 4.1. Hệ toạ độ gắn liền với bàn kẹp

Hệ toạ độ gắn liền với bàn kẹp của robot có các véctơ đơn vị chỉ phương các trục như sau:

a - vectơ có hướng tiếp cận (approach) với đối tác.

s - vectơ có hướng đường trượt (sliding) đóng mở bàn kẹp. Có tài liệu còn gọi là phương nắm bắt (occupation) và ký hiệu là **o.**

n - vectơ pháp tuyến (normal).

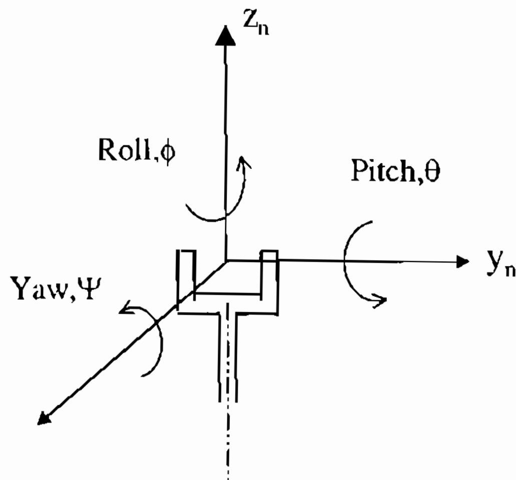
$$\mathbf{n} = \mathbf{s} \times \mathbf{a} \qquad (4.2)$$

và như vậy
$$\mathbf{s} = \mathbf{a} \times \mathbf{n} \qquad (4.3)$$

Thay ký hiệu hệ toạ độ UVW bằng **n, s, a** có thể viết lại ma trận trạng thái cuối T_E (4.1) như sau:

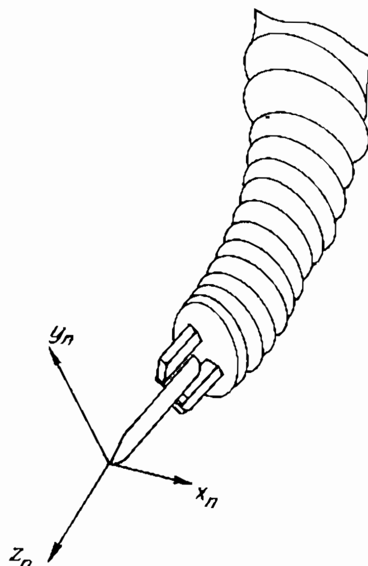
$$T_E = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x & p_x \\ n_y & s_y & a_y & p_y \\ n_z & s_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (4.4)$$

Việc định hướng khâu cuối có thể thực hiện theo phép quay Roll - Pitch - Yaw hay một số phép quay khác. Hình 4.2 biểu thị các góc quay Roll - Pitch - Yaw của bàn kẹp robot.



Hình 4.2.
Các góc quay Roll - Pitch - Yaw của bàn kẹp robot

Bàn kẹp của robot có thể tác động trực tiếp với đối tượng ví dụ cầm, nắm và di chuyển chúng. Nhiều khi các dụng cụ thao tác lại được kẹp chặt trong bàn kẹp hoặc gắn trực tiếp với cánh tay của robot. Lúc đó " điểm tác động cuối" được hiểu là điểm đầu mút của dụng cụ. Trên hình 4.3 mô tả hệ toạ độ x_n, y_n, z_n gắn liền với điểm đầu mút của dụng cụ, trong đó trục z_n nằm dọc theo phương của dụng cụ.



Hình 4.3.
Hệ tọa độ gắn liền với dụng cụ.

4.3. MÔ HÌNH ĐỘNG HỌC

4.3.1. Ma trận quan hệ

Chọn hệ toạ độ cố định gắn liền với giá đỡ và các hệ toạ độ động gắn với từng khâu động. Ký hiệu các hệ toạ độ này từ 0 đến n, kể từ giá cố định trở đi.

Một điểm bất kỳ nào đó trong không gian được xác định trong hệ toạ độ thứ i bằng bán kính véctơ $\mathbf{r}_i$ và trong hệ toạ độ cố định x_0, y_0, z_0 được xác định bằng bán kính véctơ $\mathbf{r}_0$:

$$\mathbf{r}_0 = A_1 A_2 \ldots A_i \mathbf{r}_i \qquad (4.5)$$

hoặc
$$\mathbf{r}_0 = T_i \mathbf{r}_i \qquad (4.6)$$

với
$$T_i = A_1 A_2 \ldots A_i ,\ i = 1, \ldots, n \qquad (4.7)$$

Trong đó ma trận A_1 mô tả vị trí và hướng của khâu đầu tiên; ma trận A_2 mô tả vị trí và hướng của khâu thứ 2 so với khâu đầu; ma trận A_i mô tả vị trí và hướng của khâu thứ i so với khâu thứ i - 1.

Như vậy, tích của các ma trận A_i là ma trận T_i mô tả vị trí và hướng của khâu thứ i so với giá cố định. Thường ký hiệu ma trận T với 2

chỉ số: trên và dưới. Chỉ số dưới để chỉ khâu đang xét còn chỉ số trên để chỉ toạ độ được dùng để đối chiếu. Ví dụ, biểu thức (4.7) có thể viết lại là:

$$T_i = {}^0T_i = A_1\,{}^1T_i \qquad (4.8)$$

với

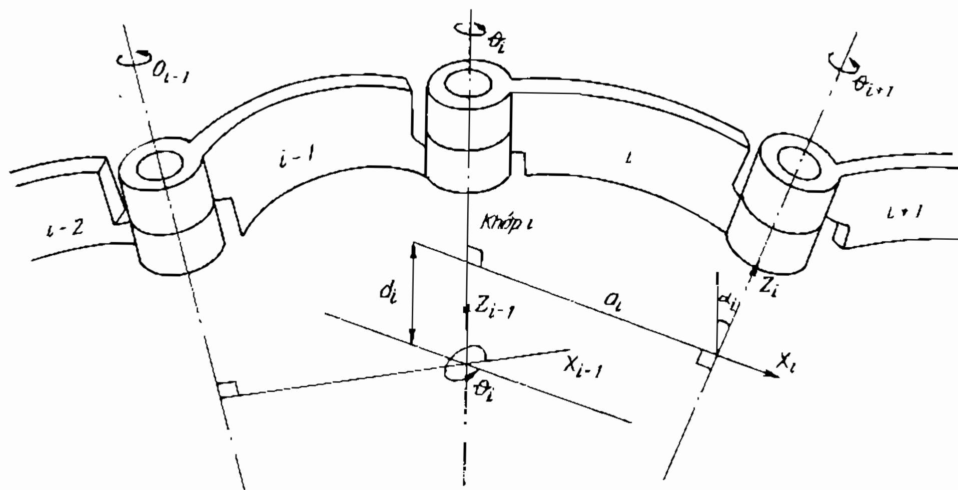
$${}^1T_i = A_2A_3 \ldots A_i \qquad (4.9)$$

là ma trận mô tả vị trí và hướng của khâu thứ i so với khâu thứ nhất. Trong ký hiệu thường bỏ qua chỉ số trên nếu chỉ số đó bằng 0.

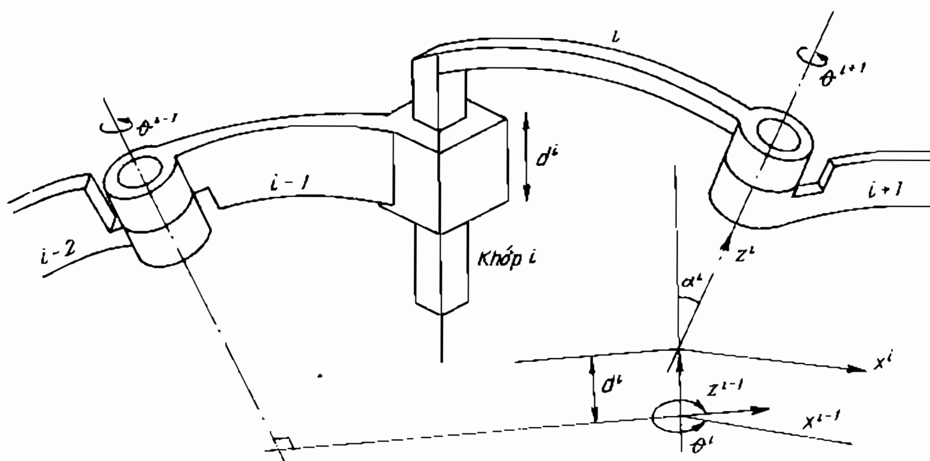
Denavit J.& Hartenberg R.S. [5] đã đề xuất dùng ma trận thuần nhất 4x4 để mô tả quan hệ giữa 2 khâu liên tiếp trong cơ cấu không gian. Pieper D.L. [12] đã đầu tiên áp dụng ma trận thuần nhất 4x4 trong nghiên cứu robot. Litvin F.L.[54] đã dùng ma trận thuần nhất 4x4 trong nghiên cứu lý thuyết ăn khớp bánh răng.

4.3.2. Bộ thông số DH

Dưới đây trình bày cách xây dựng các hệ toạ độ đối với 2 khâu động liên tiếp i và i+1. Hình 4.4 là trường hợp 2 khớp động liên tiếp là khớp quay. Hình 4.5 khớp i là khớp tịnh tiến.



Hình 4.4. Các hệ toạ độ đối với 2 khâu động liên tiếp



Hình 4.5. *Các hệ toạ độ đối với 2 khâu động liên tiếp có khớp tịnh tiến*

Trước hết xác định bộ thông số cơ bản giữa 2 trục quay của khớp động i +1 và i:

a_i là độ dài đường vuông góc chung giữa 2 trục khớp động i +1 và i.

α_i là góc chéo giữa 2 trục khớp động i +1 và i.

d_i là khoảng cách đo dọc trục khớp động i từ đường vuông góc chung giữa trục khớp động i +1 và trục khớp động i tới đường vuông góc chung giữa khớp động i và trục khớp động i-1.

θ_i là góc giữa hai đường vuông góc chung nói trên.

Bộ thông số này được gọi là bộ thông số Denavit - Hartenberg, hoặc viết tắt là *bộ thông số DH*.

Biến khớp (joint variable):

Nếu khớp động i là khớp quay thì θ_i là biến khớp.

Nếu khớp động i là tịnh tiến thì d_i là biến khớp.

Để ký hiệu biến khớp dùng thêm dấu * và trong trường hợp khớp tịnh tiến thì a_i được xem là bằng 0.

4.3.3. Thiết lập hệ toạ độ.

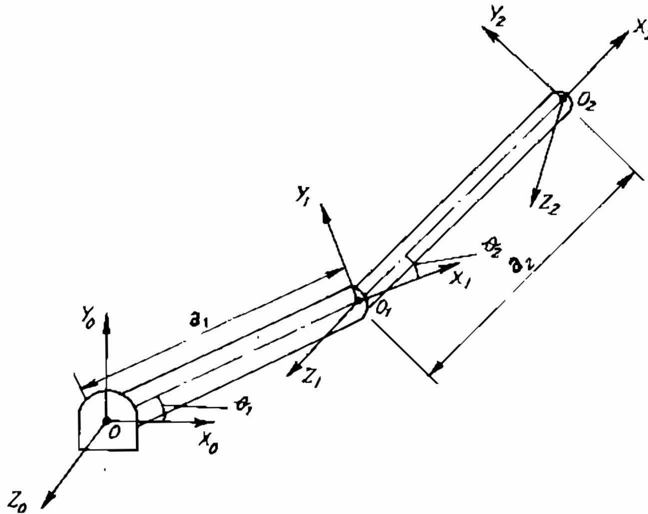
Gốc của hệ toạ độ gắn liền với khâu thứ i (gọi là hệ toạ độ thứ i) đặt tại giao điểm giữa đường vuông góc chung (a_i) và trục khớp động i+1. Trường hợp 2 trục giao nhau thì gốc hệ toạ độ lấy trùng với giao điểm đó.

Nếu 2 trục song song với nhau thì chọn gốc hệ toạ độ là điểm bất kỳ trên trục khớp động i+1.

Trục z_i của hệ toạ độ thứ i nằm dọc theo trục khớp động i+1.

Trục x_i của hệ toạ độ thứ i nằm dọc theo đường vuông góc chung hướng từ khớp động i đến khớp động i+1. Trường hợp 2 trục giao nhau, hướng trục x_i trùng với hướng véctơ tích $z_i \times z_{i-1}$, tức là vuông góc với mặt phẳng chứa z_i, z_{i-1}.

Ví dụ 1: Xét một tay máy có 2 khâu phẳng như hình 4.6



Hình 4.6. *Tay máy có 2 khâu phẳng (vị trí bất kỳ)*

Gắn các hệ toạ độ với các khâu như trên hình 4.6:

Trục z_0, z_1 và z_2 vuông góc với mặt tờ giấy.

Hệ toạ độ cố định là $o_0x_0y_0z_0$ chiều x_0 hướng từ o_0 đến o_1.

Hệ toạ độ $o_1x_1y_1z_1$ có gốc o_1 đặt tại tâm trục khớp động 2.

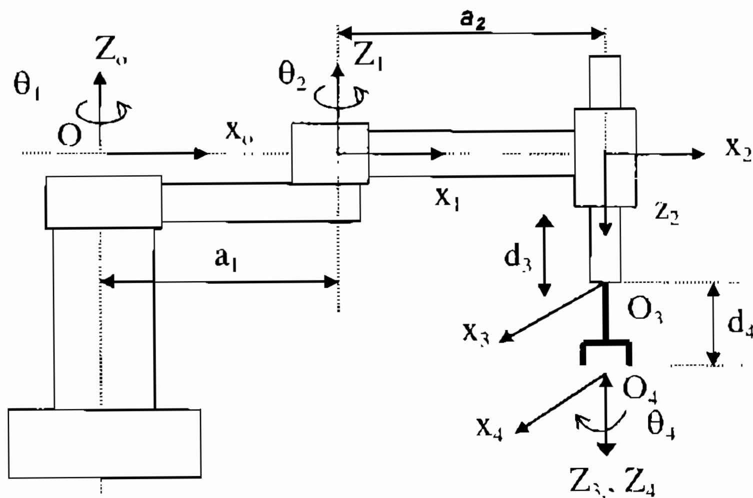
Hệ toạ độ $o_2x_2y_2z_2$ có gốc o_2 đặt tại tâm trục khớp động cuối khâu 2.

Bảng thông số DH của tay máy này như sau:

Khâu	θ_i	α_i	a_i	d_i
1	θ^*_1	0	a_1	0
2	θ^*_2	0	a_2	0

Ví dụ 2: Robot SCARA có 4 khâu như hình 4.7. Đây là robot có cấu hình kiểu RRTR.(toàn khớp quay R). Bàn kẹp có chuyển động xoay

xung quanh trục thẳng đứng. Các hệ toạ độ gắn lên các khâu như hình 4.7.



Hình 4.7. *Robot SCARA và các hệ toạ độ*

Đối với tay máy này, các trục khớp động đều song song với nhau. Bộ thông số DH của robot SCARA lập thành bảng sau:

Khâu	θ_i	α_i	a_i	D_i
1	θ^*_1	0	a_1	0
2	θ^*_2	180^0	a_2	0
3	0	0	0	D^*_3
4	θ^*_4	0	0	D_4

4.3.4. Mô hình biến đổi.

Trên cơ sở đã xây dựng các hệ toạ độ với 2 khâu động liên tiếp như trên đã trình bày, có thể thiết lập mối quan hệ giữa 2 hệ toạ độ liên tiếp theo 4 bước sau đây:

1. Quay quanh trục z_{i-1} một góc θ_i.

2. Tịnh tiến dọc trục z_{i-1} một quãng d_i.

3. Tịnh tiến dọc trục x_{i-1} (đã trùng với x_i) một đoạn a_i.

4. Quay quanh trục x_i một góc α_i.

Bốn bước biến đổi này được biểu hiện bằng tích các ma trận thuần nhất sau:

$$A_i = R(z,\theta_i).T_p(o,o,d_i).T_p(a_i,o,o).R(x,\alpha_i) \qquad (4.10)$$

Biểu thức (4.10) là quan hệ giữa hệ toạ độ i so với hệ toạ độ i-1 và được gọi là *mô hình DH* (DH - model). Cách thiết lập mô hình động học theo kiểu mô hình DH tỏ ra thuận tiện trong khi giải quyết các vấn đề cơ học robot, vì thế được dùng khá rộng rãi. Ngoài ra còn tồn tại một vài cách khác để thiết lập mô hình động học như Universal - model, S- model [26].

Các ma trận ở vế phải phương trình (4.10) tính theo các công thức (3.41), (3.37) và (3.39). Sau khi thực hiện phép nhân các ma trận nói trên, ta có:

$$A_i = \begin{bmatrix} C_{\theta i} & -S_{\theta i}C_{\alpha i} & S_{\theta i}S_{\alpha i} & a_iC_{\theta i} \\ S_{\theta i} & C_{\theta i}C_{\alpha i} & -C_{\theta i}S_{\alpha i} & a_iS_{\theta i} \\ 0 & S_{\alpha i} & C_{\alpha i} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (4.11)$$

Đối với khớp tịnh tiến (a = 0) thì ma trận A_i có dạng:

$$A_i = \begin{bmatrix} C_{\theta i} & -S_{\theta i}C_{\alpha i} & S_{\theta i}S_{\alpha i} & 0 \\ S_{\theta i} & C_{\theta i}C_{\alpha i} & -C_{\theta i}S_{\alpha i} & 0 \\ 0 & S_{\alpha i} & C_{\alpha i} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (4.12)$$

Đối với khớp quay thì biến khớp là θ_i, còn đối với khớp tịnh thì biến khớp là d_i.

4.3.5. Phương trình động học.

Ma trận T_i là tích các ma trận A_i (xem 4.7) và là ma trận mô tả vị trí và hướng của hệ toạ độ gắn liền với khâu thứ i, so với hệ toạ độ cố định. Trong trường hợp i = n, với n là số hiệu chỉ hệ toạ độ gắn liền với " điểm tác động cuối" (E) thì từ (4.7) ta có:

$$T_n = A_1A_2 \ldots A_n \qquad (4.13)$$

Mặt khác, hệ toạ độ tại " điểm tác động cuối" này được mô tả bằng ma trận T_E (xem (4.4)). Vì vậy hiển nhiên là:

$$T_E = T_n \qquad (4.14)$$

Hoặc:

$$\begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x & p_x \\ n_y & s_y & a_y & p_y \\ n_z & s_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = T_n \qquad (4.15)$$

Phương trình (4.15) là phương trình động học cơ bản của robot.

4.4. TRÌNH TỰ THIẾT LẬP HỆ PHƯƠNG TRÌNH ĐỘNG HỌC CỦA ROBOT.

Để thiết lập phương trình động học của robot, có thể tiến hành theo các bước sau:

1. Xác định các hệ toạ độ

Việc gắn hệ toạ độ với các khâu có vai trò rất quan trọng khi thiết lập hệ phương trình động học của robot. Nguyên tắc chung đã trình bày một cách tổng quát trong phần 4.3. Trong thực tế các trục nối khớp động của robot thường song song hoặc vuông góc với nhau, tức là rơi vào những trường hợp đặc biệt, nên có thể gây nhầm lẫn. Hơn nữa việc xác định các hệ toạ độ cần phải phù hợp với các phép biến đổi của ma trận A_i để có thể sử dụng được bộ thông số DH. Vì thế, trình tự xác định các hệ toạ độ cần được lưu ý các điểm sau:

- Trục z_i phải chọn cùng phương với trục khớp động i+1

- Các hệ toạ độ phải tuân theo qui tắc bàn tay phải, như đã nêu trong phần 3.1.

- Khi gắn hệ toạ độ lên các khâu, phải tuân theo các phép biến đổi của ma trận A_i (xem 4.10). Đó là 4 phép biến đổi :

$$R(z,\theta_i), T_p(o,o,d_i), T_p(a_i,o,o), R(x,\alpha_i)$$

Như vậy có thể xem hệ toạ độ thứ i + 1 là do phép biến đổi từ hệ toạ độ thứ i. Các phép quay (R) và tịnh tiến (T_p) trong các phép biến đổi này phải có mặt trong các phép biến đổi của ma trận A_i (4.10). Các thông số DH cũng được xác định dựa vào các phép biến đổi này.

Ví dụ, nếu việc gắn một hệ toạ độ nào đó mà gốc o_i đã tịnh tiến dọc theo trục y_{i-1} một đoạn thì việc làm đó không đúng vì không có phép

biến đổi T_0 (o,y,o) trong ma trận A_1. Tương tự cũng không có phép quay quanh trục y_1 trong ma trận A_1.

Việc gắn hệ toạ độ lên các khâu ở vị trí, khi mà các biến khớp có giá trị ban đầu, thường bằng 0.

2. Lập bảng thông số DH.

3. Xác định các ma trận A_i theo các thông số DH.

4. Tính các ma trận T_i.

5. Lập phương trình động học cơ bản.

Sau đây trình bày chi tiết các bước khi thiết lập hệ phương trình động học của robot:

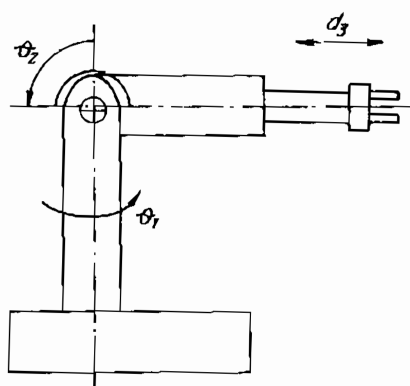
Ví dụ: Cho một robot có 3 khâu với cấu hình RRT như hình 4.8. Hãy thiết lập hệ phương trình động học của robot này.

Giải.

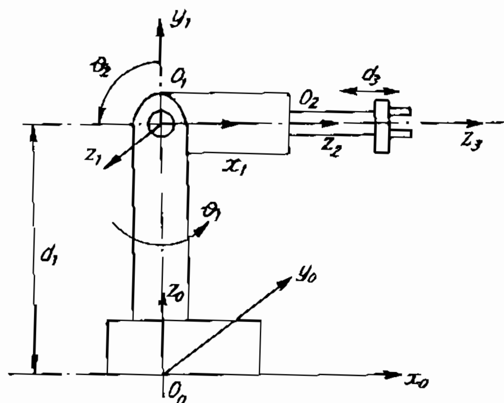
1. Xác định các hệ toạ độ

Đặt các trục toạ độ z_i (i =0,1,2,3) cùng phương với các trục khớp động, như trên hình 4.9.

Trục z_1 xem như là đã quay đi một góc 90^0 so với trục z_0. Bước quay này tương ứng với phép quay $R(x_0,\alpha_1)$ trong biểu thức tính ma trận A_1. Muốn vậy, trục x_0 phải vuông góc với z_0 và z_1. Chọn chiều của x_0 từ trái sang phải để góc quay $\alpha_1 = +90^0$ (chiều quay dương là chiều quay ngược chiều kim đồng hồ).



Hình 4.8. *Robot RRT*



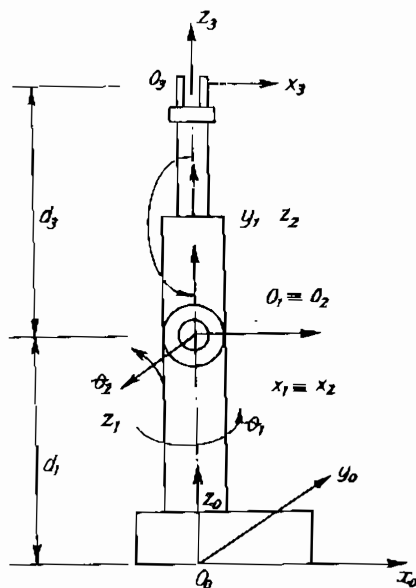
Hình 4.9. *Đặt các hệ toạ độ theo phương án 1*

Gốc o_1 đã chọn xem như là đã tịnh tiến dọc trục z_0 một đoạn d_1 so với gốc o_0 và tương ứng với phép biến đổi $T_p(o,o,d_1)$.

Các trục y_0 và y_1 xác định theo qui tắc bàn tay phải.

Nếu chọn trục z_2 như hình 4.9, tức là xem như là đã quay trục z_1 đi một góc 90^0 quanh trục y, thì phép biến đổi này không có trong biểu thức tính A_i, nên không dùng được và cần thay đổi vị trí của khâu thứ 3 như trên hình 4.10, tức là thay đổi vị trí ban đầu của robot để làm mốc tính toán.

Theo hình 4.10, trục z_2 có phương thẳng đứng, ở vị trí này xem như trục z_1 đã quay quanh trục x_1 một góc $\alpha_2 = -90^0$ để thành z_2. Nhưng nếu vẫn đặt gốc toạ độ o_2 tại vị trí cũ như phương án 1 trên hình 4.9 thì xem như là đã tịnh tiến gốc toạ độ o_1 đi một đoạn dọc trục y_1, tức là thực hiện phép tịnh tiến $T_p(o,y,o)$. Tuy nhiên phép tịnh tiến này không có mặt trong biểu thức tính A_i. Do vậy phải chọn gốc toạ độ o_2 trùng với gốc toạ độ o_1, tức là để độ tịnh tiến dọc theo trục y bằng 0.



Hình 4.10. *Hệ toạ độ gắn liền lên các khâu*

Đặt gốc o_3 tại tâm bàn kẹp và chọn trục z_3, x_3 như trên hình 4.10. Như vậy là đã tịnh tiến gốc toạ độ dọc theo trục z_2 một đoạn d_3, tương ứng với phép biến đổi $T_p(o,o,d_3)$. ở đây d_3 là biến khớp.

2. Lập bảng thông số DH như sau:

Khâu	θ_i	α_i	a_i	d_i
1	θ^*_1	90	0	d_1
2	θ^*_2	- 90	0	0
3	0	0	0	d^*_3

3. Xác định các ma trận A_i theo (4.11) với các thông số DH từ bảng trên, ta có:

$$A_1 = \begin{bmatrix} C_{\theta 1} & 0 & S_{\theta 1} & 0 \\ S_{\theta 1} & 0 & -C_{\theta 1} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} C_{\theta 2} & 0 & -S_{\theta 2} & 0 \\ S_{\theta 2} & 0 & C_{\theta 2} & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

4. Tính các ma trận T_i

Ma trận ${}^2T_3 = A_3$

Ma trận ${}^1T_3 = A_2 . {}^2T_3$

$$
{}^{1}T_3 = \begin{bmatrix} C_{\theta 2} & 0 & -S_{\theta 2} & 0 \\ S_{\theta 2} & 0 & C_{\theta 2} & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{\theta 2} & 0 & -S_{\theta 2} & -S_{\theta 2}d_3 \\ S_{\theta 2} & 0 & C_{\theta 2} & C_{\theta 2}d_3 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
$$

Ma trận $T_3 = A_1 . {}^{1}T_3$

$$
T_3 = \begin{bmatrix} C_{\theta 1} & 0 & S_{\theta 1} & 0 \\ S_{\theta 1} & 0 & -C_{\theta 1} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{\theta 2} & 0 & -S_{\theta 2} & -S_{\theta 2}d_3 \\ S_{\theta 2} & 0 & C_{\theta 2} & C_{\theta 2}d_3 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} =
$$

$$
= \begin{bmatrix} C_{\theta 1}C_{\theta 2} & -S_{\theta 1} & -C_{\theta 1}S_{\theta 2} & -C_{\theta 1}S_{\theta 2}d_3 \\ S_{\theta 1}C_{\theta 2} & C_{\theta 1} & -S_{\theta 1}S_{\theta 2} & -S_{\theta 1}S_{\theta 2}d_3 \\ S_{\theta 2} & 0 & C_{\theta 2} & C_{\theta 2}d_3 + d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
$$

5. Thiết lập phương trình động học

Theo phương trình (4.15) ở đây n = 3, ta có:

$$
\begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x & p_x \\ n_y & s_y & a_y & p_y \\ n_z & s_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = T_3
$$

Từ đó ta có hệ phương trình sau:

$n_x = C_{\theta 1} C_{\theta 2}$ $\quad$ $n_y = S_{\theta 1} C_{\theta 2}$ $\quad$ $n_z = S_{\theta 2}$

$s_x = -S_{\theta 1}$ $\quad$ $s_y = C_{\theta 1}$ $\quad$ $s_z = 0$

$a_x = - C_{\theta 1}S_{\theta 2}$ $\quad$ $a_y = -S_{\theta 1}S_{\theta 2}$ $\quad$ $a_z = C_{\theta 2}$

$p_x = - C_{\theta 1} S_{\theta 2} d_3$ $\quad$ $p_y = -S_{\theta 1} S_{\theta 2} d_3$ $\quad$ $p_z = C_{\theta 2} d_3 + d_1$

4.5. MÔ HÌNH TOÁN ĐỒ CHUYỂN ĐỔI

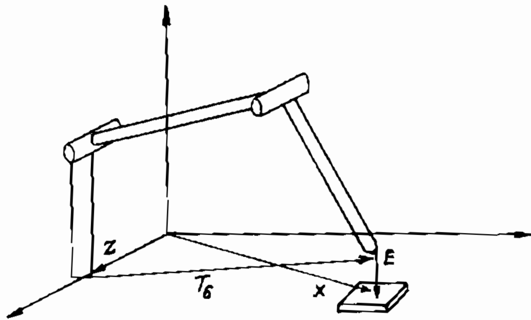
Từ (4.7) lập biểu thức T_6 đối với trường hợp n = 6, là trường hợp thường gặp:

$$T_6 = A_1A_2A_3A_4A_5A_6 \quad (4.16)$$

T_6 là ma trận mô tả vị trí và hướng của khâu thứ 6 trong hệ tọa độ cơ sở gắn với giá đỡ, có ký hiệu là số 0.

Để mô tả T_6 trong hệ toạ độ trung gian nào đó, ví dụ, hệ toạ độ thứ k, thì ta dùng cách lập biểu thức tương tự như đã làm với (4.9):

$${}^kT_6 = \prod_{i=k+1}^{6} A_i \quad (4.17)$$



Hình 4.11. *Robot và vật thể đối tác*

Khi hoạt động robot còn phải có quan hệ với đối tác và các thiết bị chung quanh, vì vậy cần mô tả T_6 trong hệ toạ độ chung nào đó. Ví dụ, hệ toạ độ cơ sở gắn liền với giá đỡ robot lại liên hệ với hệ toạ độ chung bởi phép biến đổi z (hình 4.11). Bàn kẹp của robot lại có gắn một công cụ, có quan hệ với vật thể đối tác bởi phép biến đổi E. Như vậy vị trí và hướng của công cụ tại điểm cuối được mô tả trong hệ toạ độ chung bởi X:

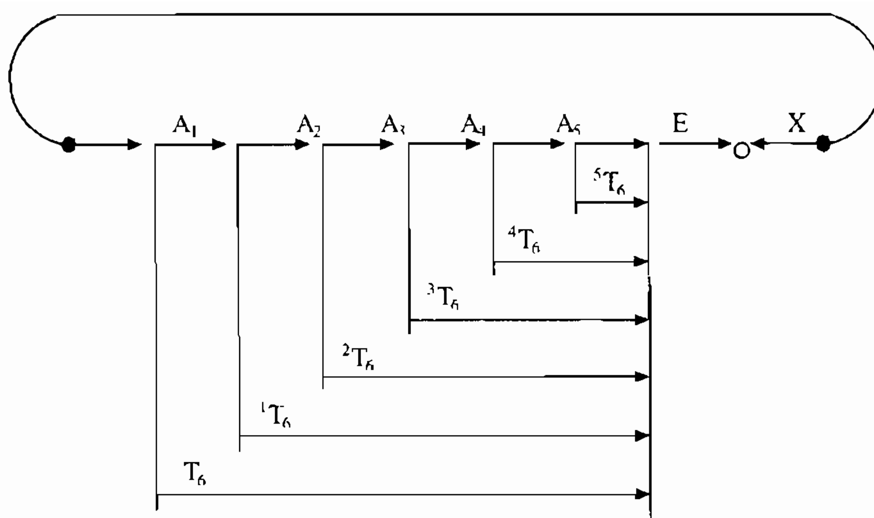
$$X = Z\,T_6E \quad (4.18)$$

Quan hệ (4.18) có thể mô tả bằng mô hình toán đồ chuyển đổi (transform graph) trên hình 4.12.

Từ toán đồ này có thể rút ra:

$$T_6 = Z^{-1}XE^{-1} \quad (4.19)$$

với Z^{-1} và E^{-1} là các ma trận nghịch đảo.

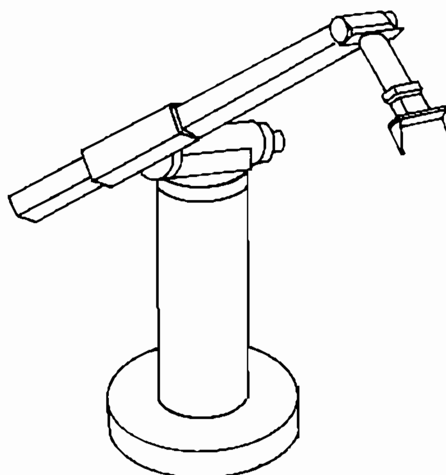


Hình 4.12. *Mô hình toán đồ chuyển đổi*

4.6. HỆ PHƯƠNG TRÌNH ĐỘNG HỌC CỦA CÁC ROBOT ĐIỂN HÌNH

4.6.1. Hệ phương trình động học của robot Stanford

Robot Stanford có 6 khâu với cấu hình RRTRRR (khớp thứ 3 là khớp tịnh tiến T, còn lại là các khớp quay R). Kết cấu của robot Stanford như hình 4.13.



Hình 4.13. *Robot Stanford*

Trên hình 4.14 trình bày mô hình của robot Stanford với việc gắn các hệ toạ độ lên từng khâu. Để đơn giản trong khi viết các phương trình động học của robot, qui ước cách viết tắt các hàm lượng giác như sau:

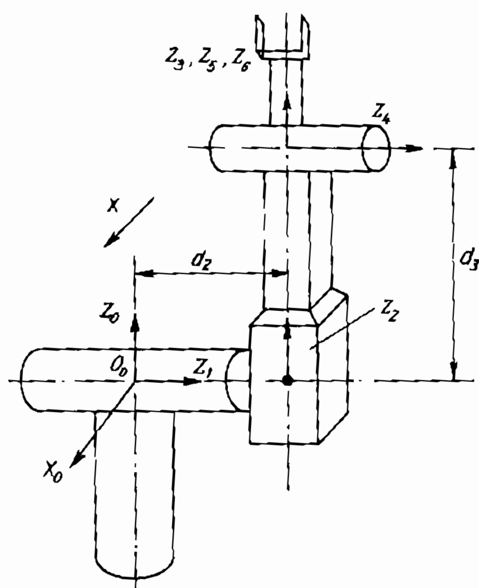
$C_1 = \cos\theta_1,\ \ C_2 = \cos\theta_2$

$S_1 = \sin\theta_1,\ \ S_2 = \sin\theta_2$

$C_{12} = \cos(\theta_1 + \theta_2),\ \ S_{12} = \sin(\theta_1 + \theta_2)$

$S_{234} = \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)$

$C_{234} = \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)$



Hệ toạ độ gắn lên các khâu của robot như hình 4.14 (kích thước của khâu chấp hành cuối có thể thay đổi khi gắn các công cụ khác nhau nên chọn $O_6 \equiv O_5$).

Hình 4.14. *Hệ toạ độ của Robot Stanford*

Bảng thông số DH (Denavit - Hartenberg) của robot Stanford như sau:

Khâu	θ	α	a_i	d_i	Khớp
1	θ_1^*	-90^0	0	0	R
2	θ_2^*	90^0	0	d_2	R
3	0	0	0	d_3^*	T
4	θ_4^*	-90^0	0	0	R
5	θ_5^*	90^0	0	0	R
6	θ_6^*	0	0	0	R
* : Các biến khớp					

Các ma trận A của robot Stanford được xác định như sau:

$$A_1 = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & -S_1 & 0 \\ S_1 & 0 & C_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad A_2 = \begin{bmatrix} C_2 & 0 & S_2 & 0 \\ S_2 & 0 & -C_2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad A_4 = \begin{bmatrix} C_4 & 0 & -S_4 & 0 \\ S_4 & 0 & C_4 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

$$A_5 = \begin{bmatrix} C_5 & 0 & S_5 & 0 \\ S_5 & 0 & -C_5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad A_6 = \begin{bmatrix} C_6 & -S_6 & 0 & 0 \\ S_6 & C_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Tích của các ma trận A_i đối với robot Stanford được bắt đầu ở khâu 6 và chuyển dần về gốc; theo thứ tự này ta có:

$${}^5T_6 = \begin{bmatrix} C_6 & -S_6 & 0 & 0 \\ S_6 & C_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

$${}^4T_6 = A_5 A_6 = \begin{bmatrix} C_5C_6 & -C_5S_6 & S_5 & 0 \\ S_5C_6 & -S_5S_6 & -C_5 & 0 \\ S_6 & C_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

$$
{}^{3}T_6 = A_4A_5A_6 = \begin{bmatrix} C_4C_5C_6 - S_4S_6 & -C_4C_5S_6 - S_4C_6 & C_4S_5 & 0 \\ S_4C_5C_6 + C_4S_6 & -S_4C_5S_6 + C_4C_6 & S_4S_5 & 0 \\ -S_5C_6 & S_5S_6 & C_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.23)
$$

$$
{}^{2}T_6 = A_3A_4A_5A_6 = \begin{bmatrix} C_4C_5C_6 - S_4S_6 & -C_4C_5S_6 - S_4C_6 & C_4S_5 & 0 \\ S_4C_5C + C_4S_6 & -S_4C_5S_6 + C_4C_6 & S_4S_5 & 0 \\ -S_5C_6 & S_5S_6 & C_5 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.24)
$$

$$
{}^{1}T_6 = A_2A_3A_4A_5A_6 = \begin{bmatrix} C_2(C_4C_5C_6 - S_4S_6) - S_2S_5C_6 & -C_2(C_4C_5C_6 + S_4C_6) + S_2S_5S_6 & C_2C_4S_5 + S_2C_5 & S_2d_3 \\ S_2(C_4C_5C_6 - S_4S_6) + C_2S_5C_6 & -S_2(C_4C_5C_6 + S_4S_6) - C_2S_5S_6 & S_2C_4S_5 - C_2C_5 & -C_2d_3 \\ S_4C_5C_6 + C_4S_6 & -S_4C_5S_6 + C_4S_6 & S_4S_5 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.25)
$$

Cuối cùng:

$$
T_6 = \begin{bmatrix} C_5C_6 & -C_5S_6 & S_5 & 0 \\ S_5C_6 & -S_5S_6 & -C_5 & 0 \\ S_6 & C_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = A_1\,{}^{1}T_6 \quad (4.26)
$$

Để tính T_6, phải nhân A_1 với ${}^{1}T_6$ sau đó cân bằng các phần tử của ma trận T_6 ở cả hai vế, được hệ thống các phương trình sau:

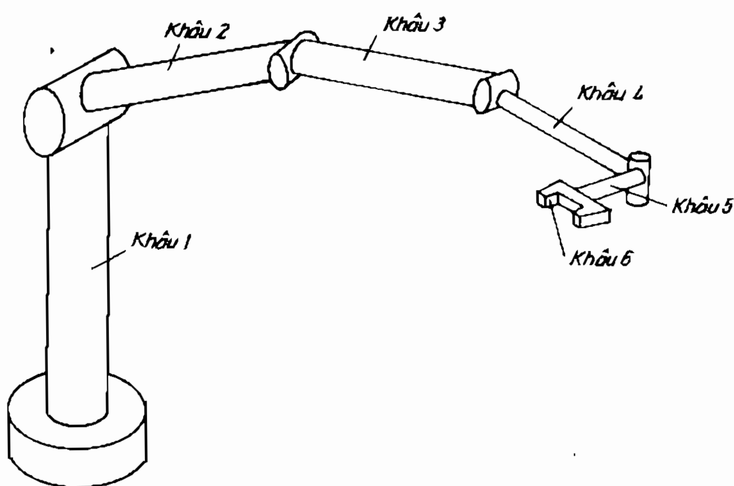
$$
\left.\begin{aligned}
n_x &= C_1[C_2(C_4C_5C_6 - S_4S_6) - S_2S_5C_6] - S_1(S_4C_5C_6 + C_4S_6)\\
n_y &= S_1[C_2(C_4C_5C_6 - S_4S_6) - S_2S_5C_6] + C_1(S_4C_5C_6 + C_4S_6)\\
n_z &= -S_2(C_4C_5C_6 - S_4S_6) - C_2S_5C_6\\
s_x &= C_1[-C_2(C_4C_5S_6 + S_4C_6) + S_2S_5S_6] - S_1(-S_4C_5S_6 + C_4C_6)\\
s_y &= S_1[-C_2(C_4C_5S_6 + S_4C_6) + S_2S_5S_6] + C_1(-S_4C_5C_6 + C_4C_6)\\
s_z &= S_2(C_4C_5S_6 + S_4C_6) + C_2S_5S_6\\
\\
a_x &= C_1(C_2C_4S_5 + S_2C_5) - S_1S_4S_5\\
a_y &= S_1(C_2C_4S_5 + S_2C_5) + C_1S_4S_5\\
a_z &= -S_2C_4S_5 + C_2C_5\\
p_x &= C_1S_2d_3 - S_1d_2\\
p_y &= S_1S_2d_3 + C_1d_2\\
p_z &= C_2d_3
\end{aligned}\right\} \quad (4.27)
$$

Nếu biết được giá trị của biến khớp, thì vị trí và hướng của bàn tay robot sẽ tìm được bằng cách xác định các giá trị các phần tử của T_6 theo các phương trình trên.

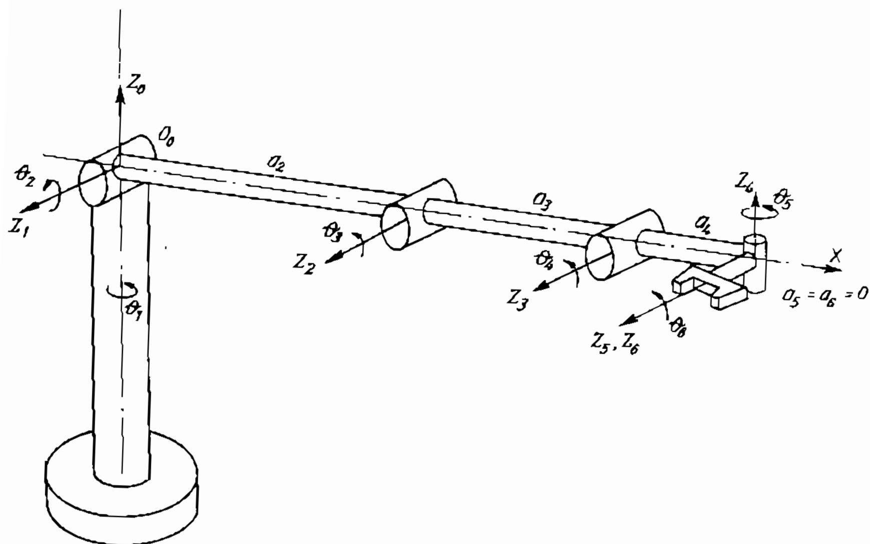
Các phương trình trên gọi là hệ phương trình động học của robot.

4.6.2. Hệ phương trình động học của robot ELBOW:

Để hiểu rõ hơn về cách thiết lập hệ phương trình động học của robot, ta xét thêm trường hợp robot Elbow (hình 4.15).



Hình 4.15. *Robot Elbow*



Hình 4.16. *Vị trí ban đầu của robot Elbow và các hệ toạ độ*

Bảng thông số DH của rôbot Elbow

Khâu	θ_i^*	α_i	a_i	d_i	Khớp
1	θ_1	90^0	0	0	R
2	θ_2	0	a_2	0	R
3	θ_3	0	a_3	0	R
4	θ_4	-90^0	a_4	0	R
5	θ_5	90^0	0	0	R
6	θ_6	0	0	0	R
* - các biến khớp					

Các ma trận A_i của robot Elbow được xác định như sau:

$$A_1 = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & S_1 & 0 \\ S_1 & 0 & -C_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \qquad A_2 = \begin{bmatrix} C_2 & -S_2 & 0 & C_2a_2 \\ S_2 & C_2 & 0 & S_2a_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} C_3 & -S_3 & 0 & C_3a_3 \\ S_3 & C_3 & 0 & S_3a_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad A_4 = \begin{bmatrix} C_4 & 0 & -S_4 & C_4a_4 \\ S_4 & 0 & C_4 & S_4a_4 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (4.28)$$

$$A_5 = \begin{bmatrix} C_5 & 0 & S_5 & 0 \\ S_5 & 0 & -C_5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad A_6 = \begin{bmatrix} C_6 & -S_6 & 0 & 0 \\ S_6 & C_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Xác định các ma trận ${}^iT_6$ theo các hệ tọa độ lần lượt từ khâu cuối trở về gốc:

$${}^5T_6 = \begin{bmatrix} C_6 & -S_6 & 0 & 0 \\ S_6 & C_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (4.29)$$

$${}^4T_6 = A_5A_6 = \begin{bmatrix} C_5C_6 & -C_5S_6 & S_5 & 0 \\ S_5C_6 & -S_5S_6 & -C_5 & 0 \\ S_6 & C_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (4.30)$$

$$^3T_6 = A_4A_5A_6 = \begin{bmatrix} C_4C_5C_6 - S_4S_6 & -C_4C_5S_6 - S_4C_6 & C_4S_5 & C_4a_4 \\ S_4C_5C_6 + C_4S_6 & -S_4C_5S_6 + C_4C_6 & S_4S_5 & S_4a_4 \\ -S_5C_6 & S_5S_6 & C_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.31).$$

$$^2T_6 = A_3A_4A_5A_6 = \begin{bmatrix} C_{34}C_5C_6 - S_{34}S_6 & -C_{34}C_5S_6 - S_{34}C_6 & C_{34}S_5 & C_{34}a_4 + C_3a_3 \\ S_{34}C_5C_6 + C_{34}S_6 & -S_{34}C_5S_6 + C_{34}C_6 & S_{34}S_5 & S_{34}a_4 + S_3a_3 \\ -S_5C_6 & S_5S_6 & C_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

$$^1T_6 = A_2A_3A_4A_5A_6 =$$

$$= \begin{bmatrix} C_{234}C_5C_6 - S_{234}S_6 & -C_{234}C_5S_6 - S_{234}C_6 & C_{234}S_5 & C_{234}a_4 + C_{23}a_3 + C_2a_2 \\ S_{234}C_5C_6 + C_{234}S_6 & -S_{234}C_5S_6 + C_{234}C_6 & S_{234}S_5 & S_{234}a_4 + S_{23}a_3 + S_2a_2 \\ -S_5C_6 & S_5S_6 & C_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.33)$$

Cuối cùng:

$$T_6 = \begin{bmatrix} n_x & S_x & a_x & p_x \\ n_y & S_y & a_y & p_y \\ n_z & S_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = A_1 {}^1T_6 \quad (4.34)$$

Để tính T_6 phải nhân A_1 với $^1T_6$ sau đó cân bằng các phần tử của ma trận T_6 được một hệ thống các phương trình sau:

$$
\left.
\begin{aligned}
n_x &= C_1(C_{234}C_5C_6 - S_{234}S_6) - S_1S_5C_6 \\
n_y &= S_1(C_{234}C_5C_6 - S_{234}S_6) + C_1S_5C_6 \\
n_z &= S_{234}C_5C_6 + C_{234}S_6 \\
S_x &= -C_1(C_{234}C_5S_6 + S_{234}C_6) + S_1S_5S_6 \\
S_y &= -S_1(C_{234}C_5S_6 + S_{234}C_6) - C_1S_5S_6 \\
S_z &= -S_{234}C_5S_6 + C_{234}C_6 \\
a_x &= C_1C_{234}S_5 + S_1C_5 \\
a_y &= S_1C_{234}S_5 - C_1C_5 \\
a_z &= - S_{234}S_5 \\
p_x &= C_1(C_{234}a_4 + C_{23}a_3 + C_2a_2 \\
p_y &= S_1(C_{234}a_4 + C_{23}a_3 + C_2a_2) \\
p_z &= S_{234} + S_{23}a_3 + S_2a_2
\end{aligned}
\right\}
\qquad (4.35)
$$

Nhận xét

Thiết lập hệ phương trình động học là bước rất quan trọng để có thể dựa vào đó để phân tích sự hoạt động của robot và lập trình điều khiển robot.

Nếu cho trước các giá trị của biểu khớp thay đổi theo thời gian, thì vị trí và hướng của bàn kẹp robot trong mọi thời điểm sẽ hoàn toàn xác định từ hệ phương trình động học nói trên. Đó là nội dung chủ yếu của bài toán động học thuận. Còn bài toán động học ngược thì lại nhằm xác định giá trị của các biến khớp theo các thông số trạng thái đã biết của " điểm tác động cuối". Để xác định được các giá trị đó cũng xuất phát từ việc giải hệ các phương trình động học nói trên.

Phương pháp thiết lập hệ các phương trình động học, trình bày trong chương này, có thể áp dụng cho robot n bậc tự do. Tuy nhiên $n \leq 6$ là những trường hợp thường gặp trong công nghiệp.

Việc tính toán các ma trận ${}^{i}T_{i}$ để thiết lập hệ các phương trình động học của robot, như đã thấy ở phần trên, là việc mất rất nhiều thời gian và dễ nhầm lẫn. Bởi vậy sẽ rất có ý nghĩa nếu sử dụng máy tính để tính toán các ma trận nói trên với lời giải không phải bằng số mà bằng các biểu thức giải tích. Trong [39] chúng tôi đã trình bày một chương trình tính toán như vậy để thiết lập các phương trình động học của robot ở dạng các biểu thức giải tích đã rút gọn. Sau đó đã cải tiến chương trình này bằng cách áp dụng MATLAB.

Để sử dụng chương trình tính toán này chỉ cần đưa vào bảng thông số DH của robot. Ví dụ, đối với robot Elbow ta đã thiết lập bảng thông số DH như trên và kết qủa tính toán sau đây in ra từ máy tính để so sánh với kết quả tính toán bằng tay ở phần trên.

Đối với một số kiểu robot khác được giới thiệu ở các phần sau, đều sử dụng chương trình máy tính này.

Thiết lập phương trình động học của robot Elbow:

Số khớp n = 6

Ma trận : A(6)

$$\begin{bmatrix} +C6 & -S6 & 0 & 0 \\ +S6 & +C6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & +1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & +1 \end{bmatrix}$$

Ma trận BDDN : T(5,6) = A(6);

Ma trận : A(5)

$$\begin{bmatrix} +C5 & 0 & +S5 & 0 \\ +S5 & 0 & -C5 & 0 \\ 0 & +1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & +1 \end{bmatrix}$$

Ma trận BDDN T(4,6) = A5*T(5,6)

T(1,1) = C5*C6;
T(1,2) = -C5*S6;
T(1,3) = S5;
T(1,4) = 0;
T(2,1) = S5*C6;
T(2,2) = -S5*S6;
T(2,3) = -C5;
T(2,4) = 0;
T(3,1) = S6;
T(3,2) = C6;
T(3,3) = 0;
T(3,4) = 0;

Ma trận : A(4)

$$\begin{bmatrix} +C4 & 0 & -S4 & +C4a4 \\ +S4 & 0 & +C4 & +S4a4 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & +1 \end{bmatrix}$$

Ma trận BDDN T(3,6) = A4*T(4,6)

T(1,1) = C4*C5*C6-S4*S6;
T(1,2) = -C4*C5*S6-S4*C6;
T(1,3) = C4*S5;
T(1,4) = C4*a4;
T(2,1) = S4*C5*C6+C4*S6;
T(2,2) = -S4*C5*S6+C4*C6;
T(2,3) = S4*S5;
T(2,4) = S4*a4;
T(3,1) = -S5*C6;
T(3,2) = S5*S6;
T(3,3) = C5;
T(3,4) = 0;

Ma trận : A(3)

$$\begin{bmatrix} +C3 & -S3 & 0 & +C3a3 \\ +S3 & +C3 & 0 & +S3a3 \\ 0 & 0 & +1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & +1 \end{bmatrix}$$

Ma trận BDDN T(2,6) = A3*T(3,6)

T(1,1) = C34*C5*C6-S34*S6;
T(1,2) = -C34*C5*S6-S34*C6;
T(1,3) = C34*S5;
T(1,4) = C34*a4+C3*a3;
T(2,1) = S34*C5*C6+C34*S6;
T(2,2) = -S34*C5*S6+C34*C6;
T(2,3) = S34*S5;
T(2,4) = S34*a4+S3*a3;
T(3,1) = -S5*C6;
T(3,2) = S5*S6;
T(3,3) = C5;
T(3,4) = 0;

Ma trận : A(2)

$$\begin{bmatrix} +C2 & -S2 & 0 & +C2a2 \\ +S2 & +C2 & 0 & +S2a2 \\ 0 & 0 & +1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & +1 \end{bmatrix}$$

Ma trận BDDN T(1,6) = A2*T(2,6)

T(1,1) = C234*C5*C6-S234*S6;
T(1,2) = -C234*C5*S6-S234*C6;
T(1,3) = C234*S5;
T(1,4) = C234*a4+C23*a3+C2*a2;
T(2,1) = S234*C5*C6+C234*S6;
T(2,2) = -S234*C5*S6+C234*C6;
T(2,3) = S234*S5;
T(2,4) = S234*a4+S23*a3+S2*a2;
T(3,1) = -S5*C6;
T(3,2) = S5*S6;
T(3,3) = C5;
T(3,4) = 0;

Ma trận : A(1)

$$\begin{bmatrix} +C1 & 0 & +S1 & 0 \\ +S1 & 0 & -C1 & 0 \\ 0 & +1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & +1 \end{bmatrix}$$

Ma trận BDDN T(0,6) = A1*T(1,6)
Hay hệ phương trình động học của robot Elbow.

Nx = C1*(C234*C5*C6-S234*S6)-S1*S5*C6;
Ox = C1*(-C234*C5*S6-S234*C6)+S1*S5*S6;
Ax = C1*(C234*S5)+S1*C5;
Px = C1*(C234*a4+C23*a3+C2*a2);
Ny = S1*(C234*C5*C6-S234*S6)+C1*S5*C6;
Oy = S1*(-C234*C5*S6-S234*C6)-C1*S5*S6;
Ay = S1*(C234*S5)-C1*C5;
Py = S1*(C234*a4+C23*a3+C2*a2);
Nz = S234*C5*C6+C234*S6;
Oz = -S234*C5*S6+C234*C6;
Az = S234*S5;
Pz = S234*a4+S23*a3+S2*a2

4.6.3 Hệ phương trình động học của robot Adept One.

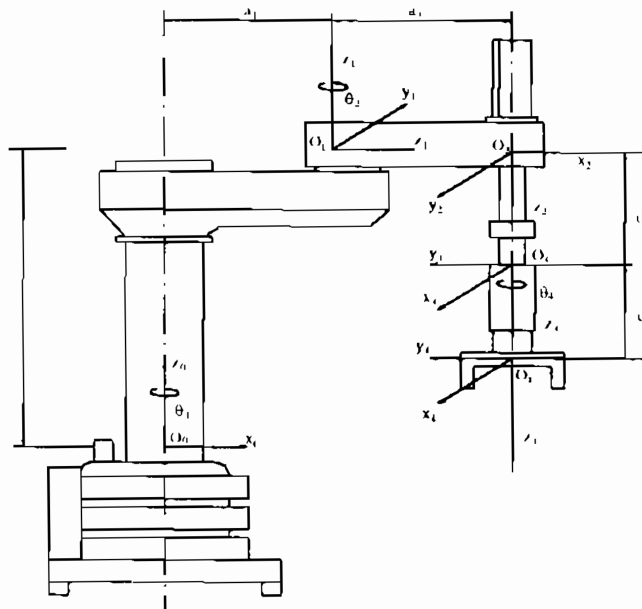
Robot Adept One là sản phẩm của Liên hiệp Công nghệ Adept (Mỹ) sản xuất. Đó là một kiểu robot thuộc loại SCARA (xem hình 4.7). Robot Adept One tuy ra đời muộn hơn nhưng đã được ứng dụng tương đối rộng rãi trong công nghiệp, trước hết là do kết cấu đơn giản.

Hình 4.17 là mô hình Robot Adept One cùng các hệ toạ độ gắn liền với các khâu. Còn trong bảng sau đây là bộ thông số DH của robot Adept One

Thông số DH của robot Adept One

Khâu	θ_i	α_i	a_i	d_i	Khớp
1	θ_1^*	0	a_1	d_1	R
2	θ_2^*	180^0	a_2	0	R
3	0	0	0	d_3^*	T
4	θ_4^*	0	0	d_4	R
*- các biến khớp					

Ở trang tiếp theo trình bày kết quả thiết lập hệ các phương trình động học robot Adept One bằng máy tính.



Hình 4.17. *Robot Adept One*

Thiết lập phương trình động học của robot Adept one.

Số khớp n = 4

Ma trận : A(4)

$$\begin{bmatrix} +C4 & -S4 & 0 & 0 \\ +S4 & +C4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & +1 & +d4 \\ 0 & 0 & 0 & +1 \end{bmatrix}$$

Ma trận BDDN : T(3,4) = A(4);

Ma trận : A(3)

$$\begin{bmatrix} +1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & +1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & +1 & +d3 \\ 0 & 0 & 0 & +1 \end{bmatrix}$$

Ma trận BDDN T(2,4) = A3*T(3,4)

T(1,1) = C4;
T(1,2) = -S4;
T(1,3) = 0;
T(1,4) = 0;
T(2,1) = S4;
T(2,2) = C4;
T(2,3) = 0;
T(2,4) = 0;
T(3,1) = 0;
T(3,2) = 0;
T(3,3) = 1;
T(3,4) = d4+d3;

Ma trận : A(2)

$$\begin{bmatrix} +C2 & +S2 & 0 & +C2a2 \\ +S2 & -C2 & 0 & +S2a2 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & +1 \end{bmatrix}$$

Ma trận BDDN T(1,4) = A2*T(2,4)

T(1,1) = C2*C4+S2*S4;
T(1,2) = -C2*S4+S2*C4;
T(1,3) = 0;

T(1,4) = C2*a2;
T(2,1) = S2*C4-C2*S4;
T(2,2) = -S2*S4-C2*C4;
T(2,3) = 0;
T(2,4) = S2*a2;
T(3,1) = 0;
T(3,2) = 0;
T(3,3) = -1;
T(3,4) = -(d4+d3);

Ma trận : A(1)

$$\begin{bmatrix} +C1 & -S1 & 0 & +C1a1 \\ +S1 & +C1 & 0 & +S1a1 \\ 0 & 0 & +1 & +d1 \\ 0 & 0 & 0 & +1 \end{bmatrix}$$

Ma trận BDDN T(0,4) = A1*T(1,4)

Hay, hệ phương trình động học của robot Adept One.

Nx = C12*C4+S12*S4;
Ox = -C12*S4+S12*C4;
Ax = 0;
Px = C12*a2+C1*a1;
Ny = S12*C4-C12*S4;
Oy = -S12*S4-C12*C4;
Ay = 0;
Py = S12*a2+S1*a1;
Nz = 0;
Oz = 0;
Az = -1;
Pz = -(d4+d3)+d1;

4.6.4 Hệ phương trình động học của robot Puma.

Robot Puma là sản phẩm của Công ty Unimate (Mỹ). Đó là loại robot được dùng rộng rãi ở nhiều nước.

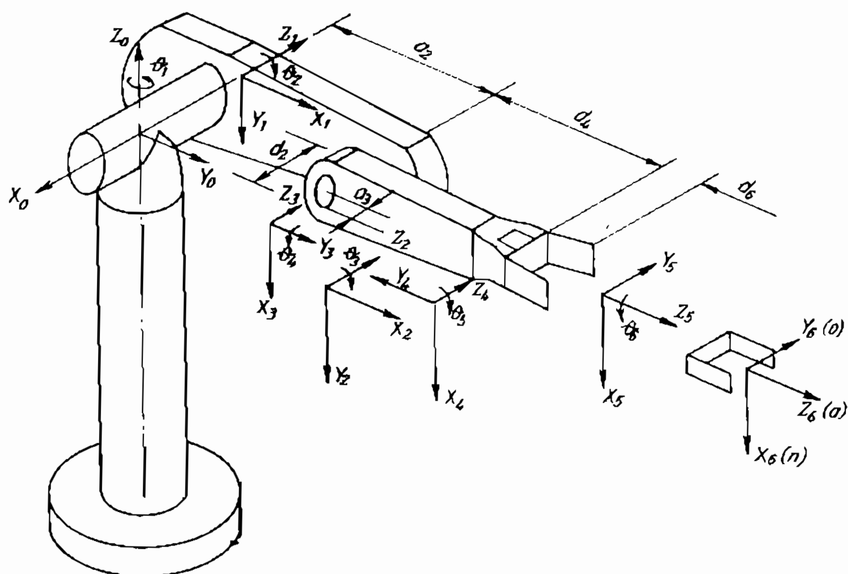
Trên hình 4.18 là mô hình robot Puma với các hệ toạ độ đã chọn. Còn trong bảng sau là bộ thông số DH của robot Puma.

Thông số DH của robot Puma

Khâu	θ_i	α_i	a_i	d_i
1	θ_1^*	-90^0	0	0
2	θ_2^*	0	a_2	d_2
3	θ_3^*	90^0	a_3	0
4	θ_4^*	-90^0	0	d_4
5	θ_5^*	90^0	0	0
6	θ_6^*	0	0	d_6

* - các biến khớp

Ở trang tiếp theo trình bày kết quả thiết lập hệ các phương trình động học robot Puma bằng máy tính.



Hình 4.18. *Robot Puma*

Thiết lập phương trình động học của robot Puma:

Số khớp n = 6

Ma trận : A(6)

$$\begin{bmatrix} +C6 & -S6 & 0 & 0 \\ +S6 & +C6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & +1 & +d6 \\ 0 & 0 & 0 & +1 \end{bmatrix}$$

Ma trận BDDN : T(5,6) = A(6);

Ma trận : A(5)

$$\begin{bmatrix} +C5 & 0 & +S5 & 0 \\ +S5 & 0 & -C5 & 0 \\ 0 & +1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & +1 \end{bmatrix}$$

Ma trận BDDN T(4,6) = A5*T(5,6)

T(1,1) = C5*C6;
T(1,2) = -C5*S6;
T(1,3) = S5;
T(1,4) = S5*d6;
T(2,1) = S5*C6;
T(2,2) = -S5*S6;
T(2,3) = -C5;
T(2,4) = -C5*d6;
T(3,1) = S6;
T(3,2) = C6;
T(3,3) = 0;
T(3,4) = 0;

Ma trận : A(4)

$$\begin{bmatrix} +C4 & 0 & -S4 & 0 \\ +S4 & 0 & +C4 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & +d4 \\ 0 & 0 & 0 & +1 \end{bmatrix}$$

Ma trận BDDN T(3,6) = A4*T(4,6)

T(1,1) = C4*C5*C6-S4*S6;
T(1,2) = -C4*C5*S6-S4*C6;
T(1,3) = C4*S5;
T(1,4) = C4*S5*d6;
T(2,1) = S4*C5*C6+C4*S6;

T(2,2) = -S4*C5*S6+C4*C6;
T(2,3) = S4*S5;
T(2,4) = S4*S5*d6;
T(3,1) = -S5*C6;
T(3,2) = S5*S6;
T(3,3) = C5;
T(3,4) = C5*d6+d4;

Ma trận : A(3)

$$\begin{bmatrix} +C3 & 0 & +S3 & +C3a3 \\ +S3 & 0 & -C3 & +S3a3 \\ 0 & +1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & +1 \end{bmatrix}$$

Ma trận BDDN T(2,6) = A3*T(3,6)

T(1,1) = C3*(C4*C5*C6-S4*S6)-S3*S5*C6;
T(1,2) = C3*(-C4*C5*S6-S4*C6)+S3*S5*S6;
T(1,3) = C3*C4*S5+S3*C5;
T(1,4) = C3*C4*S5*d6+S3*(C5*d6+d4)+C3*a3;
T(2,1) = S3*(C4*C5*C6-S4*S6)+C3*S5*C6;
T(2,2) = S3*(-C4*C5*S6-S4*C6)-C3*S5*S6;
T(2,3) = S3*C4*S5-C3*C5;
T(2,4) = S3*C4*S5*d6-C3*(C5*d6+d4)+S3*a3;
T(3,1) = S4*C5*C6+C4*S6;
T(3,2) = -S4*C5*S6+C4*C6;
T(3,3) = S4*S5;
T(3,4) = S4*S5*d6;

Ma trận : A(2)

$$\begin{bmatrix} +C2 & -S2 & 0 & +C2a2 \\ +S2 & +C2 & 0 & +S2a2 \\ 0 & 0 & +1 & +d2 \\ 0 & 0 & 0 & +1 \end{bmatrix}$$

Ma trận BDDN T(1,6) = A2*T(2,6)

T(1,1) = C23*(C4*C5*C6-S4*S6)-S23*S5*C6
T(1,2) = -C23*(C4*C5*S6+S4*C6)+S23*S5*S6
T(1,3) = C2*(C3*C4*S5+S3*C5)-S2*(S3*C4*S5-C3*C5)
T(1,4) = C2*(C3*C4*S5*d6+S3*(C5*d6+d4)+C3*a3)-
- S2*(S3*C4*S5*d6-C3*(C5*d6+d4)+S3*a3)+C2*a2
T(2,1) = S2*(C3*(C4*C5*C6-S4*S6)-S3*S5*C6)+C2*(S3*(C4*C5*C6-
-S4*S6)+C3*S5*C6)
T(2,2) = S2*(C3*(-C4*C5*S6-S4*C6)+S3*S5*S6)+C2*(S3*(-C4*C5*S6-
-S4*C6)-C3*S5*S6)

T(2,3) = S2*(C3*C4*S5+S3*C5)+C2*(S3*C4*S5-C3*C5)
T(2,4) =
S2*(C3*C4*S5*d6+S3*(C5*d6+d4)+C3*a3)+C2*(S3*C4*S5*d6-
-C3*(C5*d6+d4)+S3*a3)+S2*a2
T(3.1) = S4*C5*C6+C4*S6
T(3,2) = -S4*C5*S6+C4*C6
T(3,3) = S4*S5;
T(3,4) = S4*S5*d6+d2;

Ma trận : A(1)

$$\begin{bmatrix} +C1 & 0 & -S1 & 0 \\ +S1 & 0 & +C1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & +1 \end{bmatrix}$$

Ma trận BDDN T(0,6) = A1*T(1,6)

Hay hệ phương trình động học của robot Puma:

Nx = C1*(C23*(C4*C5*C6-S4*S6)-S23*S5*C6)-S1*(S4*C5*C6+C4*S6)
Ox = C1*(-C23*(C4*C5*S6+S4*C6)+S23*S5*S6)-S1
*(-4*C5*S6+C4*C6)
Ax = C1*(C2*(C3*C4*S5+S3*C5)-S2*(S3*C4*S5-C3*C5))-S1*S4*S5
Px = C1*(C2*(C3*C4*S5*d6+S3*(C5*d6+d4)+C3*a3)-
-S2*(S3*C4*S5*d6-C3*(C5*d6+d4)+S3*a3)+C2*a2)-S1*(S4*S5*d6+d2)
Ny = S1*(C23*(C4*C5*C6-S4*S6)-S23*S5*C6)+
+C1*(S4*C5*C6+C4*S6)
Oy = S1*(-C23*(C4*C5*S6+S4*C6)+S23*S5*S6)+C1
*(-S4*C5*S6+C4*C6)
Ay = S1*(C2*(C3*C4*S5+S3*C5)-S2*(S3*C4*S5-C3*C5))+C1*S4*S5
Py = S1*(C2*(C3*C4*S5*d6+S3*(C5*d6+d4)+C3*a3)-
-S2*(S3*C4*S5*d6-3*(C5*d6+d4)+S3*a3)+C2*a2)+C1*(S4*S5*d6+d2)
Nz = -(S2*(C3*(C4*C5*C6-S4*S6)-S3*S5*C6)+C2*(S3*(C4*C5*C6-
-S4*S6)+C3*S5*C6))
Oz = -(S2*(C3*(-C4*C5*S6-S4*C6)+S3*S5*S6)+C2*(S3*(-C4*C5*S6-
-S4*C6)-C3*S5*S6))
Az = -(S2*(C3*C4*S5+S3*C5)+C2*(S3*C4*S5-C3*C5))
Pz = -(S2*(C3*C4*S5*d6+S3*(C5*d6+d4)+C3*a3)+C2*(S3*C4*S5*d6-
-C3*(C5*d6+d4)+S3*a3)+S2*a2)

CHƯƠNG V

TỔNG HỢP CHUYỂN ĐỘNG ROBOT

5.1. NHIỆM VỤ TỔNG HỢP CHUYỂN ĐỘNG CỦA ROBOT

Ở chương trước chúng ta đã khảo sát bài toán phân tích động học robot: cho trước chương trình chuyển động cần xác định quy luật thay đổi của các thông số động học đặc trưng cho sự chuyển động của các khâu. Chương trình chuyển động được biểu thị bằng hàm $q_i(t)$, (i = 1, ... n), với q_i là toạ độ suy rộng hoặc là biến khớp.

Ở chương V này chúng ta tiến hành xây dựng phương pháp giải bài toán tổng hợp chuyển động của robot. Nhiệm vụ tổng hợp chuyển động bao gồm việc xác định bộ lời giải $q_i(t)$, (i = 1, ..., n) sao cho bàn kẹp của robot thực hiện được các chuyển dịch trước.

Các bài toán tổng hợp này rất đa dạng, tuỳ thuộc các yếu tố sau đây:

- Sự chuyển dịch trước đó ở dạng nào: dạng quỹ đạo hay phương trình nào đó; biết điểm đầu, điểm cuối hay biết một số điểm trung gian trên đường di v.v...

- Chỉ định trước các vị trí liên tiếp của bàn kẹp hay là cả định hướng của nó

- Có những hạn chế gì trong quá trình chuyển động của robot. Thông thường có 2 loại hạn chế:

1) Do kết cấu của robot mà có thể hạn chế phạm vi thay đổi về giá trị của biến khớp hoặc của vận tốc và gia tốc chuyển động.

2) Do mối trường hoạt động có yêu cầu không va chạm vào các vật xung quanh.

- Số bậc tự do của cơ cấu robot như đã phân tích ở trên có thể dư thừa hoặc không và bài toán có thể có lời giải đa trị hoặc đơn trị.

Biết quy luật chuyển động của bàn kẹp, cần xác định quy luật thay đổi các biến khớp tương ứng. Đó là nội dung chính của việc tổng hợp quỹ đạo chuyển động robot.

Có thể xem quỹ đạo chuyển động là tập hợp liên tiếp các vị trí khác nhau của bàn kẹp. Trong thực tế cũng chỉ cần xét lại một số hữu hạn các vị trí trên quỹ đạo. Tại mỗi vị trí trên quỹ đạo cần xác định bộ thông số các biến khớp q_i. Đó là nội dung của bài toán động học ngược (inverse kinematics problem) của robot.

5.2. Bài toán động học ngược

Bài toán động học ngược được đặc biệt quan tâm vì lời giải của nó là cơ sở chủ yếu để xây dựng chương trình điều khiển chuyển động của robot bám theo quỹ đạo cho trước. Có nhiều công trình nghiên cứu tìm lời giải cho bài toán này. Đối với trường hợp n > 6 thì hầu như chỉ có lời giải theo phương pháp số đối với một số loại robot cụ thể nào đó, nhưng chưa có một phương pháp chung nào có hiệu quả cả. Bản thân việc giải bài toán động học ngược bằng phương pháp số nhiều khi đòi hỏi thời gian tính toán kéo dài, thậm chí không đi đến lời giải. Sở dĩ như vậy là vì thường gặp các hệ phương trình siêu việt không phải lúc nào cũng có độ hội tụ lời giải. Điều đó ảnh hưởng lớn đến việc đảm bảo thời gian thực trong điều khiển robot.

Đối với trường hợp n = 6, là trường hợp thường gặp trong thực tế công nghiệp nên có nhiều công trình nghiên cứu hơn.Tuy nhiên, ở đây các lời giải tìm được hầu như chỉ cho trường hợp riêng, có đặc điểm hình động học riêng biệt được tận dụng để thiết lập các quan hệ cần thiết khi thiết lập lời giải. Trong đó nên lưu ý đến các công trình sau: [7] giải bài toán động học ngược của robot Purna theo phương pháp hình học; đặc biệt là công trình [12] dùng phương pháp biến đổi ngược các ma trận thuần nhất 4x4, áp dụng cho robot Stanford. Nhược điểm của phương pháp này là chưa có cách chung để xác định một lời giải có thể thích hợp ngay trong số khá nhiều lời giải có thể tồn tại.

Trong [35] đã tiến hành độc lập việc thử tìm một phương pháp giải cho trường hợp robot n bậc tự do. Còn trong [38] lại đề xuất một phương pháp thực dụng, gọi tên là phương pháp "các nhóm 3".

Xuất phát từ phương trình động học cơ bản (4.15) ta có:

$$T_n = A_1 A_2 \ldots A_n = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x & p_x \\ n_y & s_y & a_y & p_y \\ n_z & s_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (5.1)$$

Các ma trận A_i (i = 1,2,... n) là hàm của các biến khớp q_i. Véctơ định vị bàn kẹp hoặc " điểm tác động cuối" $\mathbf{p} = (p_x\ p_y\ p_z)^T$ cũng là hàm của q_i. Các véctơ **n**, **s**, **a** là các véctơ đơn vị chỉ phương các trục của hệ toạ

độ gắn liền với bàn kẹp hoặc " điểm tác động cuối" biểu diễn trong hệ toạ độ cố định XYZ . Các véctơ này vuông góc với nhau từng đôi một, cho nên trong 9 thành phần của chúng tồn tại đôc lập chỉ có 3 thành phần.

Hai ma trận ơ vế trái và ở vế phải của phương trình (5.1) đều là các ma trận thuần nhất 4x4. So sánh các phần tử tương ứng của 2 ma trận trên ta có 6 phương trình độc lập với các ẩn số q_i, (i = 1,2, ...n). Có 3 trường hợp có thể xảy ra:

- Nếu số ẩn số (thường cũng là số bậc tự do của cơ cấu robot) n< 6 thì lời giải không hoàn chỉnh, tức là lúc này cơ cấu robot không đưa bàn kẹp tới vị trí và định hướng như mong muốn được hoặc có thể, ví dụ, đạt tới vị trí nhưng không thoả mãn yêu cầu về định hướng. Trường hợp này có thể áp dụng khi không có yêu cầu hoàn chỉnh về các thông số định vị và định hướng của bàn kẹp.

- Nếu n = 6, tức là số ẩn số bằng số phương trình thì bộ biến khớp $q_1 \div q_6$ hoàn toàn xác định. Tuy nhiên, lời giải không phải lúc nào cũng dễ dàng tìm ra. Bởi vì, nói chung các phương trình này có thể là siêu việt và hệ phương trình siêu việt này không phải lúc nào cũng có độ hội tụ của lời giải.

- Nếu n > 6, tức là số ẩn số lớn hơn số phương trình thì có khả năng có nhiều lời giải, tức là cùng đạt tới một vị trí và định hướng của bàn kẹp có thể có nhiều bộ thông số biến khớp q_i.

Xuất phát từ ý muốn để độ cơ động của robot nâng cao, tức là hoạt động linh hoạt hơn thì cơ cấu chấp hành như một cơ cấu không gian, phải có nhiều bậc tự do hơn 6. Khi đó cơ cấu robot có thể có nhiều phương án để đạt tới đích. Điều đó cũng rất cần thiết, nhất là khi môi trường làm việc có các chướng ngại vật. Tuy nhiên lúc này lại nảy sinh khó khăn trong tính toán vì sự đa trị của lời giải. Nhiều trường hợp máy tính không chọn được lời giải thích hợp hoặc chọn quá lâu nên không thể quyết định kịp thời các giá trị của biến khớp để điều khiển chuyển động của robot. Sở dĩ như vậy là do khi giải bài toán thường gặp các hệ phương trình siêu việt, như đã nói, không phải lúc nào cũng có lời giải. Ngoài ra có những lời giải không được xem là thích hợp nếu chúng vượt ra ngoài phạm vi hạn chế của các biến khớp, tuỳ thuộc kết cấu cụ thể của robot.

5.3. CÁC PHƯƠNG PHÁP GIẢI BÀI TOÁN ĐỘNG HỌC NGƯỢC.

5.3.1. Trường hợp robot n bậc tự do

Như đã đề cập ở phần trên, khi giải quyết nhiệm vụ tổng hợp quỹ đạo chuyển động của robot thường nhiều lần phải lặp lại việc giải bài toán động học ngược .Trong khá nhiều trường hợp giải bằng phương pháp số

lại không xác định được lời giải thích hợp. hoặc thời gian tìm kiếm lời giải quá lâu do gặp khó khăn như giải hệ phương trình siêu việt, hoặc vì tính đa trị của lời giải cũng như sự đa dạng của các cấu hình trung gian của cơ cấu robot. Vì vậy có nhiều công trình nghiên cứu để tìm lời giải cho các bài toán động học ngược ở dạng công thức. Hầu hết các phương pháp đều dùng cho các trường hợp cơ cấu robot cụ thể nào đó và tất cả đều là trường hợp từ 6 bậc tự do trở xuống.

Nội dung phương pháp trình bày dưới đây là đối với trường hợp robot n bậc tự do [35].

Vế trái của phương trình (5.1) theo cách ký hiệu như (4.7) ÷ (4.9) có thể viết lại như sau:

$$T_n = T_i\,{}^iT_n \tag{5.2}$$

Nhân hai vế của (5.2) với T_i^{-1} ta có:

$$T_i^{-1}T_n = {}^iT_n \quad \text{và vì } T_i^{-1} = (A_1A_2...A_i)^{-1} = A_i^{-1}...A_2^{-1}A_1^{-1}$$

ta có:

$$A_i^{-1}...A_2^{-1}A_1^{-1}T_n = {}^iT_n \tag{5.3}$$

Kết hợp với (5.1) ta có:

$${}^iT_n = A_i^{-1}...A_2^{-1}A_1^{-1}\begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x & p_x \\ n_y & s_y & a_y & p_y \\ n_z & s_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{5.4}$$

với i thay đổi từ 1 đến n-1.

Ứng với mỗi giá trị của i, khi so sanh các phần tử tương ứng của 2 ma trận ở 2 vế của biểu thức (5.4) ta có 6 phương trình tồn tại độc lập để xác định biến khớp q_i.

Như thế, bằng cách đó có nhiều khả năng để lựa chọn các bộ lời giải q_i đa trị này. Trong nhiều trường hợp từ hệ các phương trình này có thể xác định q_i bằng các biểu thức giải tích. Việc này rất quan trọng, nhất là khi cần nhanh chóng có lời giải để đảm bảo thời gian thực trong điều khiển robot. Tuy nhiên cũng phải tuỳ thuộc vào loại cơ cấu robot cụ thể mới nhận biết được từ các phương trình nào trong hệ các phương trình này có thể tìm được biểu thức tính q_i ở dạng công thức.

5.3.2. Giải bài toán động học ngược của robot Stanford [12]

Hệ phương trình động học của robot Stanford đã được thiết lập trong phần (4.6.1). Robot Stanford có 6 bậc tự do.

Từ biểu thức (5.3) ứng với $i = 1 \div 5$, lần lượt ta có:

$$A_1^{-1}T_6 = {}^1T_6 \qquad (5.5)$$

$$A_2^{-1}A_1^{-1}T_6 = {}^2T_6 \qquad (5.6)$$

$$A_3^{-1}A_2^{-1}A_1^{-1}T_6 = {}^3T_6 \qquad (5.7)$$

$$A_4^{-1}A_3^{-1}A_2^{-1}A_1^{-1}T_6 = {}^4T_6 \qquad (5.8)$$

$$A_5^{-1}A_4^{-1}A_3^{-1}A_2^{-1}A_1^{-1}T_6 = {}^5T_6 \qquad (5.9)$$

* Sử dụng các biểu thức tương ứng đã có trong phần (4.6.1) tính vế trái của phương trình (5.5):

$$A_1^{-1}T_6 = \begin{bmatrix} C_1 & S_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ -S_1 & C_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x & p_x \\ n_y & s_y & a_y & p_y \\ n_z & s_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (5.10)$$

$$A_1^{-1}T_6 = \begin{bmatrix} C_1n_x + S_1n_y & C_1S_x + S_1S_y & C_1a_x + S_1a_y & C_1p_x + S_1p_y \\ -n_z & -S_z & -a_z & -p_z \\ S_1n_x + C_1n_y & S_1S_x + C_1S_y & S_1a_x + C_1a_y & S_1p_x + C_1p_y \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \qquad (5.11)$$

Vế phải của (5.5) là ma trận (4.25) đối với ${}^1T_6$. So sánh các phần tử ở hàng 3 cột 4 của 2 ma trận (5.11) và (4.25) ta có:

$$-S_1p_x + C_1p_y = d_2 \qquad (5.12)$$

Thay thế:

$$p_x = r\cos\phi \quad \text{và} \quad p_y = r\sin\phi \qquad (5.13)$$

trong đó:

$$r = \pm\sqrt{p_x^2 + p_y^2} \qquad (5.14)$$

$$\phi = \text{arctg}\,2\,(p_y, p_x) \qquad (5.15)$$

vào (5.12), ta có:

$$\sin\phi\cos\theta_1 - \cos\phi\sin\theta_1 = \frac{d_2}{r} \qquad (5.16)$$

với: $$0 < \frac{d_2}{r} \le 1$$

hay là:

$$\sin(\phi - \theta_1) = \frac{d_2}{r}$$

với $$0 < (\phi - \theta_1) < \pi \qquad (5.17)$$

từ đó:

$$\cos(\phi - \theta_1) = +\sqrt{1 - \left(\frac{d_2}{r}\right)^2}$$

Trong đó dấu trừ (-) phù hợp với hình thể vai trái của robot và dấu cộng phù hợp với hình thể vai phải của robot (hình 4.13).

Cuối cùng ta có:

$$\theta_1 = arctg2(p_x, p_y) - arctg2(d_2, \pm\sqrt{r^2 - d_2^2}) \qquad (5.18)$$

* Tiếp theo, cho cân bằng các phần tử ở hàng 1 cột 4 và hàng 2 cột 4 của 2 ma trận (5.11) và (4.25), ta có:

$$S_2 d_3 = C_1 p_x + S_1 p_y \qquad (5.20)$$

$$-C_2 d_3 = -p_z \qquad (5.21)$$

d_3 là độ dịch chuyển dài của khớp tịnh tiến, $d_3 > 0$, nên từ (5.20) và (5.21) ta có:

$$\theta_2 = arctg\,2\,(C_1 p_x + S_1 p_y, p_z) \qquad (5.22)$$

Từ phương trình (5.6) và tính A_1^{-1}, A_2^{-1} từ (4.20), ta có vế trái là một ma trận có dạng sau:

$$\begin{bmatrix} f_{21}(n) & f_{21}(s) & f_{21}(a) & 0 \\ f_{22}(n) & f_{22}(s) & f_{22}(a) & 0 \\ f_{23}(n) & f_{23}(s) & f_{23}(a) & f_{23}(p) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = {}^2T_6 \qquad (5.23)$$

Trong đó ký hiệu rút gọn:

$$\left.\begin{aligned} f_{21} &= C_2(C_1x + S_1y) - S_2z \\ f_{22} &= -S_1x + C_1y \\ f_{23} &= S_2(C_1x + S_1y) + C_2z \end{aligned}\right\} \qquad (5.24)$$

và x, y, z trong các ký hiệu đó tương ứng là các thành phần của các vectơ **n**, **s**, **a** và **p** viết trong dấu ngoặc đơn, ví dụ:

$$f_{21}(n) = C_2(C_1n_x + S_1n_y) - S_2n_z$$

$$f_{22}(s) = -S_1s_x + C_1s_y$$

$$f_{23}(a) = -Sa_x + C_1a_y$$

Còn vế phải của (5.23) là ma trận (4.24).

Cân bằng các phần tử ở hàng 3 cột 4 của 2 ma trận ở vế trái và ở vế phải của (5.23), ta có:

$$d_3 = S_2(C_1p_x + S_1p_y) + C_2p_z$$

(5.25)

* Tiếp theo, triển khai phương trình (5.8), thực hiện phép nhân các ma trận ở vế trái và biểu diễn ở dạng ký hiệu rút gọn như sau:

$$\begin{bmatrix} f_{41}(n) & f_{41}(s) & f_{41}(a) & 0 \\ f_{42}(n) & f_{42}(s) & f_{42}(a) & 0 \\ f_{43}(n) & f_{43}(s) & f_{43}(a) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = {}^4T_6 \qquad (5.26)$$

Trong đó:

$$\left.\begin{aligned} f_{41} &= C_4[C_2(C_1x + S_1y) - S_2z] + S_4(-S_1x + C_1y) \\ f_{42} &= -S_2(C_1x + S_1y) - C_2z \\ f_{43} &= -S_4[C_2(C_1x + S_1y) - S_2z] + C_4(-S_1x + C_1y) \end{aligned}\right\} \qquad (5.27)$$

Cân bằng các phần tử hàng 3 cột 3 của 2 ma trận ở hai vế của (5.26) với ${}^4T_6$ là ma trận (4.22), ta có:

$$f_{43}(a) = 0$$

Hoặc

$$-S_4[C_2(C_1a_x + S_1a_y) - S_2a_z] + C_4(-S_1a_x + C_1a_y) = 0 \qquad (5.28)$$

Đây là phương trình lượng giác có dạng:

$-\text{Sin}\,\phi\, a_x + \cos\phi\, a_y = 0$

Như đã giải trong các phần trước đây, phương trình (5.28) có 2 nghiệm:

$$\left.\begin{aligned} &\theta_4 = \text{arctg } 2\,(-S_1a_x + C_1a_y\,,\, C_2(C_1a_x + S_1a_y) - S_2a_z) \\ \text{và} \quad &\theta_4 = \theta_4 + 180^0 \end{aligned}\right\} \quad (5.29)$$

(hiểu theo cách viết khi lập trình trên máy tính).

Nếu các yếu tố của hàm (5.29) tiến tới 0 thì rơi vào tình trạng suy biến như đã nói ở mục (3.4.2).

Cũng có thể tìm giá trị của biến khớp θ_4 bằng cách cân bằng các phần tử ở hàng 1 cột 3 và hàng 2 cột 3 của phương trình ma trận (5.23).

$$\left.\begin{aligned} C_4S_5 &= C_2(C_1a_x + S_1a_y) - S_2a_z \\ S_4S_5 &= -S_1a_x + C_1a_y \end{aligned}\right\} \quad (5.30)$$

từ đó cũng nhận được kết quả đúng như (5.29):

$$\theta_4 = \text{arctg } 2\,[-S_1a_x + C_1a_y\,,\, C_2(C_1a_x + S_1a_y) - S_2a_z]$$

với $\theta_5 > 0$

và $\theta_4 = \theta_4 + 180^0$

với $\theta_5 < 0$

Khi $S_5 = 0$, $\theta_5 = 0$, robot suy biến do cả hai trục của khớp 4 và 6 nằm thẳng hàng ($Z_3 \equiv Z_5$). ở vị trí này chỉ có tổng $\theta_4 + \theta_6$ là có ý nghĩa.

Khi $\theta_5 = 0$, có thể tuỳ ý chọn một giá trị nào đó của θ_4, thường chọn giá trị hiện hành.

Từ vế phải của phương trình (5.26) có thể nhận được các phương trình để giải S_5, C_5, S_6 và C_6.

Chẳng hạn khi cân bằng các phần tử hàng 1 cột 3 và hàng 2 cột 3 ta có :

$$\left.\begin{aligned} S_5 &= C_4\,[C_2(C_1a_x + S_1a_y) - S_2a_z] + S_4(-S_1a_x + C_1a_y) \\ C_5 &= S_2(C_1a_x + S_1a_y) + C_2a_z \end{aligned}\right\} \quad (5.31)$$

Từ đó suy ra:

$$\theta_5 = \text{arctg } 2\,\{C_4[C_2(C_1a_x + S_1a_y) - S_2a_z] + \\ + S_4(-S_1a_x + C_1a_y),\, S_2(C_1a_x + S_1a_y) + C_2a_z\} \quad (5.32)$$

Tiếp theo, triển khai phương trình (5.9), ta có phương trình biểu diễn ở dạng ký hiệu như sau:

$$\begin{bmatrix} f_{51}(n) & f_{51}(s) & 0 & 0 \\ f_{52}(n) & f_{52}(s) & 0 & 0 \\ f_{53}(n) & f_{53}(s) & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = {}^5T_6 \qquad (5.33)$$

Trong đó ${}^5T_6$ là ma trận (4.21) và:

$$f_{51} = C_5\{C_4[C_2(C_1x+S_1y)-S_2z]+S_4(-S_1x+C_1y)\}+S_5[-S_2(C_1x+S_1y)-C_2z]$$
$$f_{52} = -S_4[C_2(C_1x+S_1y)-S_2z]+C_4[-S_1x+C_1y]$$
$$f_{53} = S_5\{C_4[C_2(C_1x+S_1y)-S_2z]+S_4(-S_1x+C_1y)\}+C_5[C_2(C_1x+S_1y)+C_2z]$$

Cho cân bằng các phần tử ở hàng 1 cột 2 và hàng 2 cột 2 ta nhận được các giá trị của S_6 và C_6:

$$S_6 = -C_5\{C_4[C_2(C_1s_x+S_1s_y)-S_2s_z]+S_4(-S_1s_x+C_1s_y)\}+S_5[S_2(C_1s_x+S_1s_y)+C_2s_z]$$
$$C_6 = -S_4[C_2(C_1s_x+S_1s_y)-S_2s_y]+C_4[-S_1s_x+C_1s_y] \qquad (5.34)$$

Từ đó xác định được:

$$\theta_6 = arctg2(S_6, C_6) \qquad (5.35)$$

Các biểu thức (5.19), (5.22), (5.25), (5.29), (5.32) và (5.35) xác định tệp nghiệm của bài toán động học ngược của robot Stanford.

5.3.3 Giải bài toán động học ngược của robot Elbow [12]

Hệ phương trình động học của robot Elbow đã được thiết lập trong phần (4.6.2) bằng các biểu thức từ (4.28) đến (4.34). Ở đây cũng tiến hành theo cách làm như ở phần trên. Trước hết khảo sát phương trình:

$$A_1^{-1}\,T_6 = {}^1T_6 \qquad (5.36)$$

Trong đó ${}^1T_6$ là ma trận (4.33), còn vế trái là ma trận biểu thị ở dạng sau:

$$\begin{bmatrix} f_{11}(n) & f_{11}(s) & f_{11}(a) & f_{11}(p) \\ f_{12}(n) & f_{12}(s) & f_{12}(a) & f_{12}(p) \\ f_{13}(n) & f_{13}(s) & f_{13}(a) & f_{13}(p) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = {}^1T_6 \qquad (5.37)$$

Dùng ký hiệu tương tự ở trên:

$$f_{11} = C_1x + S_1y$$
$$f_{12} = z$$
$$f_{13} = S_1x - C_1y$$

Cho cân bằng các phần tử ở hàng 3 cột 4 của 2 ma trận ở 2 vế của phương trình (5.37), ta có:

$$S_1p_x - C_1p_y = 0 \qquad (5.38)$$

Suy ra :

$$\theta_1 = \text{arctg } 2(p_y, p_x)$$

và
$$\theta_1 = \theta_1 + 180^0 \qquad (5.39)$$

Trong trường hợp robot Elbow, ba khớp kế tiếp đều song song và không có kết quả nào nhận được từ các phép nhân ma trận nghịch đảo. Cho đến khâu thứ 4, tức là khi có biểu thức sau:

$$A_4^{-1}\, A_3^{-1}\, A_2^{-1}\, A_1^{-1}\, A_6^{-1} = {}^4T_6 \qquad (5.40)$$

Trong đó ${}^4T_6$ là ma trận (4.30), và sau các phép nhân ma trận ta có.

$$\begin{bmatrix} f_{41}(n) & f_{41}(s) & f_{41}(a) & f_{41}(p) - C_{34}a_2 - C_4a_3 - a_4 \\ f_{42}(n) & f_{42}(s) & f_{42}(a) & 0 \\ f_{43}(n) & f_{43}(s) & f_{43}(a) & f_{43}(p) + S_{34}a_2 + S_4a_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = {}^4T_6 \qquad (5.41)$$

Ký hiệu:

$$f_{41} = C_{234}(C_1x + S_1y) + S_{234}z$$
$$f_{42} = -S_1x + C_1y$$
$$f_{43} = -S_{234}(C_1x + S_1y) + C_{234}z$$

Cho cân bằng các phần tử hàng 3 cột 3 của 2 ma trận ở 2 vế phương trình (5.41), ta có một phương trình tính θ_{234}:

$$-S_{234}(C_1a_x + S_1a_y) + C_{234}a_z = 0 \tag{5.42}$$

Suy ra:

$$\left.\begin{aligned} &\theta_{234} = \text{arctg } 2\,(a_z\,,\, C_1a_x + S_1a_y) \\ \text{và} \quad &\theta_{234} = \theta_{234} + 180^0 \end{aligned}\right\} \tag{5.43}$$

Tiếp theo cân bằng các phần tử 2 ma trận (5.37) hàng 1 cột 4 và hàng 2 cột 4, ta có:

$$C_1p_x + S_1p_y = C_{234}a_4 + C_{23}a_3 + C_2a_2 \tag{5.44}$$

$$p_z = S_{234}a_4 + S_{23}a_3 + S_2a_2 \tag{5.45}$$

Đặt:

$$p'_x = C_1p_x + S_1p_y - C_{234}a_4 \tag{5.46}$$

$$p'_y = p_z - S_{234}a_4 \tag{5.47}$$

Cộng (5.44) với (5.46) và (5.45) với (5.47), ta có:

$$p'_x = C_{23}a_3 + C_2a_2 \tag{5.48}$$

$$p'_y = S_{23}a_3 + S_2a_2 \tag{5.49}$$

Từ đó ta có:

$$p'^2_x + p'^2_y = (C_{23}a_3 + C_2a_2)^2 + (S_{23}a_3 + S_2a_2)^2$$
$$= (S_{23}^2 + C_{23}^2)\,a_3^2 + (S_2^2 + C_2^2)\,a_2^2 + 2a_2a_3(C_{23}C_2 + S_{23}S_2)$$

Bởi vì:

$$C_{23}C_2 + S_{23}S_2 = \cos(\theta_2 + \theta_3 - \theta_2) = \cos\theta_3 = C_3$$

Suy ra:

$$C_3 = \frac{p'^2_x + p'^2_y - a_3^2 - a_2^2}{2a_2a_3} \tag{5.50}$$

Tuy có thể tìm θ_3 từ hàm arccos, nhưng vẫn nên tìm một giá trị S_3 và dùng hàm arctg 2 như thường lệ:

Ta có:

$$S_3 = \pm\sqrt{(1 - C_3^2)}$$

Cặp nghiệm ứng với 2 dấu ± tuỳ thuộc vào hình thể của robot lúc nâng vai lên hoặc hạ vai xuống.

Để tìm S_2 và C_2 giải hệ phương trình (5.48) và (5.49). Hệ phương trình này có thể biến đổi thành:

$$\theta_3 = arctg2(S_3, C_3) \tag{5.51}$$

$$(C_2C_3 - S_2S_3)a_3 + C_2a_2 = p'_x$$
$$(S_2C_3 + C_2S_3)a_3 + S_2a_2 = p'_y$$

$$\left.\begin{aligned}(C_3a_3 + a_2).C_2 - S_3a_3.S_2 = p'_x \\ S_3a_3.C_2 + (C_3a_3 + a_2).S_2 = p'_y\end{aligned}\right\} \tag{5.52}$$

Khai triển và rút gọn lại thành hệ phương trình với 2 biến là S_2 và C_2.

Giải hệ phương trình (5.52), ta có:

$$C_2 = \frac{(C_3a_3 + a_2)p'_x + S_3a_3p'_y}{(C_3a_3 + a_2)^2 + (S_3a_3)^2} \tag{5.53}$$

$$S_2 = \frac{(C_3a_3 + a_2)p'_y - S_3a_3p'_x}{(C_3a_3 + a_2)^2 + (S_3a_3)^2} \tag{5.54}$$

Do mẫu số của (5.53) và (5.54) đều dương và bằng nhau, nên:

$$\theta_2 = arctg\ 2\ [(C_3a_3+a_2)\ p'_y - S_3a_3p'_x\ ,\ (C_3a_3 + a_2)p'_x + S_3a_3p'_y] \tag{5.55}$$

Đến đây có thể xác định θ_4:

$$\theta_4 = \theta_{234} - \theta_3 - \theta_2 \tag{5.56}$$

Tiếp theo cho cân bằng các phần tử của 2 ma trận ở hàng 1 cột 3 và hàng 2 cột 3 của phương trình (5.41):

$$S_5 = C_{234}\ (C_1a_x + S_1a_y) + S_{234}a_z \tag{5.57}$$

$$C_5 = S_1a_x - C_1a_y \tag{5.58}$$

Suy ra:

$$\theta_5 = arctg\ 2\ [C_{234}(C_1a_x + S_1a_y) + S_{234}a_z,\ S_1a_x - C_1a_y] \tag{5.59}$$

Cuối cùng, để xác định θ_6 dùng phương trình:

$$A_5^{-1}\ .\ {}^4T_6 = {}^5T_6 \tag{5.60}$$

Trong đó ${}^5T_6$ là ma trận (4.29), còn ma trận vế trái được viết ở dạng sau:

$$\begin{bmatrix} f_{51}(n) & f_{51}(s) & 0 & 0 \\ f_{52}(n) & f_{52}(s) & 0 & 0 \\ f_{53}(n) & f_{53}(s) & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_6 & -S_6 & 0 & 0 \\ S_6 & C_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.61)$$

Ký hiệu:

$$\left.\begin{aligned} f_{51} &= C_5[C_{234}(C_1x + S_1y) + S_{234}z] - S_5(S_1x - C_1y) \\ f_{52} &= -S_{234}(C_1x + S_1y) + C_{234}z \end{aligned}\right\} \quad (5.62)$$

Cho cân bằng các phần tử ma trận tương ứng, ta có:

$$S_6 = -C_5[C_{234}(C_1s_x + S_1s_y) + S_{234}s_z] - S_5(S_1s_x - C_1s_y) \quad (5.63)$$

$$C_6 = -S_{234}(C_1s_x + S_1s_y) + C_{234}s \quad (5.64)$$

Vậy

$$\theta_6 = arctg2(S_6, C_6) \quad (5.65)$$

Các công thức (5.39), (5.55), (5.51), (5.56), (5.59) và (5.65) xác định tệp nghiệm của bài toán động học ngược của robot Elbow.

5.3.4. Phương pháp "các nhóm 3"

Theo phương pháp chung, trình bày ở phần (5.3.1) ngay cả đối với trường hợp n =6 qua các ví dụ ở phần (5.3.2) và (5.3.3) khó khăn là ở chỗ làm sao xác định được phương trình nào trong hệ các phương trình đó mới tính được ra q_i ở dạng công thức.

Có thể nói chưa có thuật toán chung nào mà nhờ đó có thể tìm ra được tệp nghiệm của bài toán động học ngược cho mọi robot. Phương pháp [38] giới thiệu sau đây có thể xác định q_i một cách dễ dàng và trực giác hơn.

Nội dung của phương pháp "các nhóm 3" được giải nghĩa như sau:

Như đã biết, vị trí một điểm trong không gian hoàn toàn được xác định trong hệ tọa độ 3 chiều, nên có thể phân cơ cấu robot ra những nhóm 3. Nói chung viết thành: 3+3+3+ ....Tuy nhiên gốc toạ độ của nhóm 3 kể từ nhóm thứ 2 trở đi đều cùng là đối tượng cần xác định. Đối với các loại robot dùng trong công nghiệp thường có ít hơn hoặc bằng 6 bậc tự do,

nên việc phân nhóm 3+3 lại phù hợp với các thao tác trong thực tế. Thao tác đầu tiên là robot đưa bàn kẹp đến gần vị trí làm việc. Có thể gọi tên là thao tác "thô". Sau đó bàn kẹp được xê dịch nhỏ và xoay hướng cho phù hợp với công việc. Thao tác này gọi là thao tác "tinh". Vậy các nhóm 3+3 tương ứng với các thao tác "thô"+"tinh".

Giải các bài toán động học ngược đối với trường hợp n =3, trở nên đơn giản hơn nhiều. Có thể dùng phương pháp hình giải tích thông thường hoặc dùng hệ các phương trình từ (5.7) với n =3 và lưu ý các vấn đề sau đây:

Đối với nhóm 3 thực hiện thao tác "thô"thì thường chỉ quan tâm đến vị trí, mà không quan tâm đến định hướng nên các thành phần của của các vectơ **n**, **s**, **a** đều bằng 0.

Đối với nhóm 3 thực hiện thao tác "tinh" thì ngược lại, cho các thành phần của véctơ **p** bằng 0.

Nhược điểm của phương pháp này, như đã nói ở trên, gốc toạ độ của các nhóm 3, kể từ nhóm thứ 2 trở đi đều là những vị trí cần xác định hoặc cho trước. Thông thường người ta cho trước chúng như những điểm tựa công nghệ.

CHƯƠNG VI

ĐỘNG HỌC ROBOT KHI DI CHUYỂN NHỎ

6.1. GIỚI THIỆU CHUNG

Tính toán về động học robot khi di chuyển nhỏ sẽ nhận được những quan hệ vi phân. Chúng có tầm quan trọng nhất định trong một số trường hợp, ví dụ như khi lắp ráp cần vi chỉnh các giá trị chuyển dịch của các khớp để đáp ứng yêu cầu có những thay đổi rất nhỏ về định vị và định hướng của hệ toạ độ gắn liền với điểm tác động cuối của bàn kẹp robot. Hoặc khi camera đang quan sát điểm tác động cuối của robot, cần vi chỉnh về định vị và định hướng để đạt được một mục đích nào đó, thì lúc này rất cần biết các quan hệ vi phân khi chuyển đổi qua lại giữa hệ toạ độ gắn liền với camera và hệ toạ độ gắn liền với điểm tác động cuối. Các quan hệ vi phân này còn dùng để tính toán độ chính xác cơ cấu về sự biến thiên của lực tác động lên các khâu và về sự ổn định tốc độ di chuyển v.v.

6.2. QUAN HỆ DI CHUYỂN NHỎ ĐỐI VỚI HỆ TOẠ ĐỘ CỐ ĐỊNH.

Cho T là hệ toạ độ ở khớp thứ i nào đó của cơ cấu tay máy, khi có di chuyển nhỏ ta có:

$$T + dT = \text{Trans}(dx, dy, dz)\ \text{Rot}(kd\theta).\ T \qquad (6.1)$$

Trong đó: Trans (dx, dy, dz) - biểu thị các di chuyển nhỏ tịnh tiến dọc trục dx, dy, dz trong hệ toạ độ cố định.

Rot (k,dθ) - biểu thị các độ quay nhỏ dθ quanh trục vectơ k trong hệ toạ độ cố định.

Có thể viết (6.1) thành:

$$dT = \Delta.\ T \qquad (6.2)$$

với

$$\Delta = \text{Trans}(dx, dy, dz)\ \text{Rot}(k, \theta) - I \qquad (6.3)$$

Theo phép biến đổi tịnh tiến (xem mục 3.3.1):

$$\text{Trans}(d) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & dx \\ 0 & 1 & 1 & dy \\ 0 & 0 & 1 & dz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (6.4)$$

$$\mathbf{d} = dx\,\mathbf{i} + dy\,\mathbf{j} + dz\,\mathbf{k} \qquad (6.5)$$

$$\text{Rot}(k,\theta) = \begin{bmatrix} k_x^2 V_\theta + C_\theta & k_x k_y V_\theta - k_z S_\theta & k_x k_z V_\theta + k_y S_\theta & 0 \\ k_x k_y V_\theta + k_z S_\theta & k_y^2 V_\theta + C_\theta & k_y k_z V_\theta - k_x S_\theta & 0 \\ k_x k_z V_\theta - k_y S_\theta & k_y k_z V_\theta + k_x S_\theta & k_z^2 V_\theta + C_\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.6)$$

Đối với trường hợp di chuyển nhỏ:

$$\left.\begin{aligned} &\lim_{\theta \to 0} \sin\theta \to d\theta \\ &\lim_{\theta \to 0} \cos\theta \to 1 \\ &\lim_{\theta \to 0} vers\theta \to 0 \end{aligned}\right\} \quad (6.7)$$

Đã dùng các ký hiệu: $S_\theta = \sin\theta$, $C_\theta = \cos\theta$, $V_\theta = vers\theta$

($Ver\sin\theta = 1 - \cos\theta$)

Vì vậy:

$$\text{Rot}(k,\theta) = \begin{bmatrix} 1 & -k_z d\theta & k_y d\theta & 0 \\ k_z d\theta & 1 & -k_x d\theta & 0 \\ -k_y d\theta & k_x d\theta & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.8)$$

Thay vào (6.3), ta có:

$$\Delta = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_x \\ 0 & 1 & 0 & d_y \\ 0 & 0 & 1 & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -k_z d\theta & k_y d\theta & 0 \\ k_z d\theta & 1 & -k_x d\theta & 0 \\ -k_y d\theta & k_x d\theta & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\Delta = \begin{bmatrix} 0 & -k_z d\theta & k_y d\theta & dx \\ k_z d\theta & 0 & -k_x d\theta & d_y \\ -k_y d\theta & k_x d\theta & 0 & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6.9)$$

Vận dụng phép quay quanh các trục toạ độ (xem mục 3.3.2) đối với trường hợp di chuyển nhỏ có các giới hạn (6.7), ta nhận được:

$$\mathrm{Rot}(x,\delta_x).\mathrm{Rot}(y,\delta_y).\mathrm{Rot}(z,\delta_z) = \begin{bmatrix} 1 & -\delta_z & \delta_y & 0 \\ \delta_z & 1 & -\delta_x & 0 \\ -\delta_y & \delta_x & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.10)$$

với $$\boldsymbol{\delta} = \delta_x \mathbf{i} + \delta_y \mathbf{j} + \delta_z \mathbf{k} \quad (6.11)$$

So sánh các phần tử của 2 ma trận (6.8) và (6.10), ta có:

$$\left.\begin{aligned} k_x d\delta &= \delta_x \\ k_y d\delta &= \delta_y \\ k_z d\delta &= \delta_z \end{aligned}\right\} \quad (6.12)$$

Thay (6.12) vào (6.9) ta có:

$$\Delta = \begin{bmatrix} 0 & -\delta_z & \delta_y & d_x \\ \delta_z & 0 & -\delta_x & d_y \\ -\delta_y & \delta_x & 0 & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6.13)$$

Ví dụ 1: Cho hệ toạ độ T

$$T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 10 \\ 1 & 0 & 0 & 5 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Khi có những di chuyển nhỏ tịnh tiến d và quay δ:

$$\mathbf{d} = 1.\mathbf{i} + 0.\mathbf{j} - 0{,}5.\mathbf{k}$$

$$\boldsymbol{\delta} = 0.\mathbf{i} + 0{,}1.\mathbf{j} + 0.\mathbf{k}$$

hãy xác định độ dịch chuyển dT trong hệ toạ độ cố định

Giải:

Theo các số liệu trên ta thiết lập Δ theo (6.13):

$$\Delta = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0,1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0,1 & 0 & 0 & 0,5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Thay vào (6.2), ta có:

$$dT = \Delta.T = \begin{bmatrix} 0 & 0,1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0,1 & -0,5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

6.3. QUAN HỆ DI CHUYỂN NHỎ GIỮA CÁC HỆ TOẠ ĐỘ VỚI NHAU

Phương trình (6.2) cho biết quan hệ di chuyển nhỏ (quan hệ vi phân) đối với hệ toạ độ cố định. Còn quan hệ di chuyển nhỏ đối với hệ toạ độ đã cho nào đó có thể biểu thị bằng phương trình sau:

$$dT = T.\,^{T}\Delta \qquad (6.14)$$

So sánh (6.2) và (6.14) ta có:

$$\Delta.\,T = T.\,^{T}\Delta \qquad (6.15)$$

từ đó:

$$^{T}\Delta = T^{-1}\,\Delta.\,T \qquad (6.16)$$

Nếu biểu thị các phần tử của T bằng các vectơ n, s, a như vẫn thường làm trước đây, ta có:

$$T = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x & p_x \\ n_y & s_y & a_y & p_y \\ n_z & s_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (6.17)$$

với:

$$\left.\begin{aligned} \mathbf{n} &= n_x\mathbf{i} + n_y\mathbf{j} + n_z\mathbf{k} \\ \mathbf{s} &= s_x\mathbf{i} + s_y\mathbf{j} + s_z\mathbf{k} \\ \mathbf{a} &= a_x\mathbf{i} + a_y\mathbf{j} + a_z\mathbf{k} \end{aligned}\right\} \tag{6.18}$$

Thay vào (6.16) và sau vài phép biến đổi ta có:

$$\Delta = \begin{bmatrix} 0 & -\boldsymbol{\delta}.\mathbf{a} & \boldsymbol{\delta}.\mathbf{s} & \boldsymbol{\delta}.(\mathbf{p}\times\mathbf{n}) + \mathbf{d}.\mathbf{n} \\ \boldsymbol{\delta}.\mathbf{a} & 0 & -\boldsymbol{\delta}.\mathbf{n} & \boldsymbol{\delta}.(\mathbf{p}\times\mathbf{s}) + \mathbf{d}.\mathbf{s} \\ -\boldsymbol{\delta}.\mathbf{s} & \boldsymbol{\delta}.\mathbf{n} & 0 & \boldsymbol{\delta}.(\mathbf{p}\times\mathbf{a}) + \mathbf{d}.\mathbf{a} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{6.19}$$

Mặt khác, ${}^T\Delta$ có thể tính như sau:

$${}^T\Delta = \begin{bmatrix} 0 & -{}^T\delta_z & {}^T\delta_y & {}^Td_x \\ {}^T\delta_z & 0 & -{}^T\delta_x & {}^Td_y \\ -{}^T\delta_y & {}^T\delta_x & 0 & {}^Td_z \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{6.20}$$

So sánh các phần tử của 2 ma trận (6.19) và (6.20), ta có:

$$\left.\begin{aligned} {}^Td_x &= \boldsymbol{\delta}.(\mathbf{p}\times\mathbf{n}) + \mathbf{d}.\mathbf{n} = \mathbf{n}.[(\boldsymbol{\delta}\times\mathbf{p}) + \mathbf{d}] \\ {}^Td_y &= \boldsymbol{\delta}.(\mathbf{p}\times\mathbf{s}) + \mathbf{d}.\mathbf{s} = \mathbf{s}.[(\boldsymbol{\delta}\times\mathbf{p}) + \mathbf{d}] \\ {}^Td_z &= \boldsymbol{\delta}.(\mathbf{p}\times\mathbf{a}) + \mathbf{d}.\mathbf{a} = \mathbf{a}.[(\boldsymbol{\delta}\times\mathbf{p}) + \mathbf{d}] \end{aligned}\right\} \tag{6.21}$$

$$\left.\begin{aligned} {}^T\delta_x &= \boldsymbol{\delta}.\mathbf{n} = \mathbf{n}.\boldsymbol{\delta} \\ {}^T\delta_y &= \boldsymbol{\delta}.\mathbf{s} = \mathbf{s}.\boldsymbol{\delta} \\ {}^T\delta_z &= \boldsymbol{\delta}.\mathbf{a} = \mathbf{a}.\boldsymbol{\delta} \end{aligned}\right\} \tag{6.22}$$

Các phương trình (6.21) và (6.22) biểu thị các thành phần của 2 vectơ chuyển dịch nhỏ tịnh tiến và quay (${}^T\mathbf{d}$ và ${}^T\boldsymbol{\delta}$) đối với hệ toạ độ T.

Trên cơ sở đó ta có thể thiết lập quan hệ giữa các di chuyển nhỏ giữa các hệ toạ độ với nhau bằng ma trận 6x6 sau đây:

$$\begin{bmatrix} {}^T d_x \\ {}^T d_y \\ {}^T d_z \\ {}^T \delta_x \\ {}^T \delta_y \\ {}^T \delta_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x & n_y & n_z & (\mathbf{p}\times\mathbf{n})_x & (\mathbf{p}\times\mathbf{n})_y & (\mathbf{p}\times\mathbf{n})_z \\ s_x & s_y & s_z & (\mathbf{p}\times\mathbf{s})_x & (\mathbf{p}\times\mathbf{s})_y & (\mathbf{p}\times\mathbf{s})_z \\ a_x & a_y & a_z & (\mathbf{p}\times\mathbf{a})_x & (\mathbf{p}\times\mathbf{s})_y & (\mathbf{p}\times\mathbf{s})_z \\ 0 & 0 & 0 & n_x & n_y & n_z \\ 0 & 0 & 0 & s_x & s_y & s_z \\ 0 & 0 & 0 & a_x & a_y & a_z \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \\ \delta_x \\ \delta_y \\ \delta_z \end{bmatrix} \quad (6.23)$$

Ví du 2. Cho hệ toạ độ T và các di chuyển nhỏ **d** và **δ** như trong ví dụ 1. Hãy xác định độ dịch chuyển tương đương ${}^T\mathbf{d}$ và ${}^T\boldsymbol{\delta}$ trong hệ toạ độ T.

Giải:

Biểu thị các phần tử của ma trận T theo dạng (6.17):

$$T = \begin{bmatrix} n_x & n_y & a_x & p_x \\ n_y & s_y & a_y & p_y \\ n_z & s_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

trong đó:

$$\overline{\mathbf{n}} = 0.\overline{\mathbf{i}} + 1.\overline{\mathbf{j}} + 0.\overline{\mathbf{k}}$$

$$\overline{\mathbf{s}} = 0.\overline{\mathbf{i}} + 0.\overline{\mathbf{j}} + 1.\overline{\mathbf{k}}$$

$$\overline{\mathbf{a}} = 1.\overline{\mathbf{i}} + 0.\overline{\mathbf{j}} + 0.\overline{\mathbf{k}}$$

$$\overline{\mathbf{p}} = 10.\overline{\mathbf{i}} + 5.\overline{\mathbf{j}} + 0.\overline{\mathbf{k}}$$

Vậy:

$$\boldsymbol{\delta}\times\mathbf{p} = \begin{bmatrix} i & j & k \\ 0 & 0,1 & 0 \\ 10 & 5 & 0 \end{bmatrix} = 0.\overline{\mathbf{i}} + 0.\overline{\mathbf{j}} - 1.\overline{\mathbf{k}}$$

và $\boldsymbol{\delta} \times \mathbf{p} + \mathbf{d} = 1.\,\mathbf{i} + 0.\mathbf{j} - 0,5.\mathbf{k}$

Thay vào (6.21), ta có:

$${}^T\mathbf{d} = {}^T d_x.\mathbf{i} + {}^T d_y.\mathbf{j} + {}^T d_z.\mathbf{k} = 0.\,\mathbf{i} - 0,5.\mathbf{j} + 1.\mathbf{k}$$

$^T\boldsymbol{\delta} = {}^T\delta_x.\mathbf{i} + {}^T\delta_y.\mathbf{j} + {}^Td_z.\mathbf{k} = 0,1.\,\mathbf{i} - 0.\mathbf{j} + 0.\mathbf{k}$

Có thể kiểm tra lại công thức (6.14):

$$dT = T.\,^T\Delta$$

Trước hết xác định $^T\Delta$ theo ^Td và $^T\delta$ theo (6.20):

$$^T\Delta = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0,1 & -0,5 \\ 0 & 0,1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Vậy:

$$dA = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 10 \\ 0 & 0 & 0 & 5 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} .\,^T\Delta = \begin{bmatrix} 0 & 0,1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0,1 & -0,5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

6.4. JACOBIAN ĐỐI VỚI CƠ CẤU TAY MÁY

Xét trường hợp phổ biến cơ cấu tay máy có 6 bậc tự do. Sự thay đổi nhỏ về định vị và định hướng của T_6 được gây nên bởi các dq_i của các khớp động.

Theo (6.14) ta viết:

$$\partial T_6 = T_6\,^{T6}\Delta_i.\partial q_i = A_1A_2...A_{i-1}\,^{i-1}\Delta_i A_i...A_6\partial q_i \qquad (6.24)$$

Suy ra:

$$\frac{\partial T_6}{\partial q_i} = T_6\,^{T6}\Delta_i \qquad (6.25)$$

Với các viết ký hiệu thường dùng như (4.7) ÷ (4.9) thì:

$$T_6 = \underbrace{A_1A_2...A_{i-1}}\,.\,\underbrace{A_iA_{i+1}...A_5A_6}$$

$$T_6 = \quad {}^0T_{i-1} \quad . \quad {}^{i-1}T_6$$

Vậy
$$T_6^{-1} = {}^{i-1}T_6 .\ {}^0T_{i-1}^{-1}$$

Từ (6.24) ta xác định $^{T6}\Delta$:

$$^{T6}\Delta_i = {}^{i-1}T_6^{-1}.{}^{i-1}\Delta_i.{}^{i-1}T_6 \quad (6.26)$$

với

$$^{i-1}T_6 = A_i A_{i+1} \ldots A_6 \quad (6.27)$$

Đối với khớp quay:

$$^{i-1}\Delta_i = \begin{bmatrix} 0 & -d\theta_i & 0 & 0 \\ d\theta_i & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Còn đối với khớp tịnh tiến:

$$^{i-1}\Delta_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & dd_i \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Ta thường biểu diễn (xem mục 4.2) ma trận T dưới dạng sau:

$$T = \begin{bmatrix} \mathbf{n}_i & \mathbf{s}_i & \mathbf{a}_i & \mathbf{p}_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.28)$$

Vậy nếu khớp i là khớp quay thì $d_i = 0$ và từ (6.21); (6.22) ta có:

$$\left.\begin{aligned} {}^{T6}d_{ix} &= \mathbf{n}_i(\boldsymbol{\delta}_i \times \mathbf{p}_i) \\ {}^{T6}d_{iy} &= \mathbf{s}_i(\boldsymbol{\delta}_i \times \mathbf{p}_i) \\ {}^{T6}d_{iz} &= \mathbf{a}_i(\boldsymbol{\delta}_i \times \mathbf{p}_i) \end{aligned}\right\} \quad (6.29)$$

$$\left.\begin{aligned} {}^{T6}\delta_{ix} &= \mathbf{n}_i\boldsymbol{\delta}_i \\ {}^{T6}\delta_{iy} &= \mathbf{s}_i\boldsymbol{\delta}_i \\ {}^{T6}\delta_{iz} &= \mathbf{a}_i\boldsymbol{\delta}_i \end{aligned}\right\} \quad (6.30)$$

Đồng thời $\boldsymbol{\delta}_i = 0.\mathbf{i} + 0.\mathbf{j} + 1.\,\mathbf{k}$ nên (6.29) và (6.30) còn đơn giản hơn nữa:

$$\left.\begin{aligned} {}^{T6}d_x &= -n_{ix}p_{iy} + n_{iy}p_{ix} \\ {}^{T6}d_y &= -s_{ix}p_{iy} + s_{iy}p_{ix} \\ {}^{T6}d_z &= -a_{ix}p_{iy} + a_{iy}p_{ix} \end{aligned}\right\} \qquad (6.31)$$

$$\left.\begin{aligned} {}^{T6}\delta_x &= n_{iz} \\ {}^{T6}\delta_y &= s_{iz} \\ {}^{T6}\delta_z &= a_{iz} \end{aligned}\right\} \qquad (6.32)$$

Còn đối với trường hợp khớp tịnh tiến $\boldsymbol{\delta} = 0$ và $\mathbf{d} = 0.\mathbf{i} + 0.\mathbf{j} + 0.\mathbf{k}$ thì:

$$ {}^{T6}\mathbf{d}_i = n_{iz}.\,\mathbf{i} + s_{iz}.\,\mathbf{j} + a_{iz}.\,\mathbf{k} \qquad (6.33)$$

$$ {}^{T6}\boldsymbol{\delta}_i = 0.\mathbf{i} + 0.\mathbf{j} + 0.\mathbf{k} \qquad (6.34)$$

Như vậy sự thay đổi nhỏ về định vị và định hướng của T_6 phụ thuộc vào 6 toạ độ khớp động và có thể mô tả bằng ma trận 6x6, được gọi là Jacobian của cơ cấu tay máy sau đây:

$$\begin{bmatrix} {}^{T6}d_x \\ {}^{T6}d_y \\ {}^{T6}d_z \\ {}^{T6}\delta_x \\ {}^{T6}\delta_y \\ {}^{T6}\delta_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^{T6}d_{1x} & {}^{T6}d_{2x} & {}^{T6}d_{3x} & {}^{T6}d_{4x} & {}^{T6}d_{5x} & {}^{T6}d_{6x} \\ {}^{T6}d_{1y} & {}^{T6}d_{2y} & {}^{T6}d_{3y} & {}^{T6}d_{4y} & {}^{T6}d_{5y} & {}^{T6}d_{6y} \\ {}^{T6}d_{1z} & {}^{T6}d_{2z} & {}^{T6}d_{3z} & {}^{T6}d_{4z} & {}^{T6}d_{5z} & {}^{T6}d_{6z} \\ {}^{T6}\delta_{1x} & {}^{T6}\delta_{2x} & {}^{T6}\delta_{3x} & {}^{T6}\delta_{4x} & {}^{T6}\delta_{5x} & {}^{T6}\delta_{6x} \\ {}^{T6}\delta_{1y} & {}^{T6}\delta_{2y} & {}^{T6}\delta_{3y} & {}^{T6}\delta_{4y} & {}^{T6}\delta_{5y} & {}^{T6}\delta_{6y} \\ {}^{T6}\delta_{1z} & {}^{T6}\delta_{2z} & {}^{T6}\delta_{3z} & {}^{T6}\delta_{4z} & {}^{T6}\delta_{5z} & {}^{T6}\delta_{6z} \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} dq_1 \\ dq_2 \\ dq_3 \\ dq_4 \\ dq_5 \\ dq_6 \end{bmatrix} \qquad (6.35)$$

Trong đó các phần tử ở mỗi cột của Jacobian tương ứng các vi phân độ di chuyển tịnh tiến và quay của mỗi khớp động.

6.5. TRÌNH TỰ GIẢI BÀI TOÁN THUẬN KHI DI CHUYỂN NHỎ

Bài toán được đặt ra như sau: Cho biết trạng thái của T_6 (biết định vị và định hướng của điểm tác động cuối, tức là cũng biết các phần tử của ma trận T_6), cần xác định độ di chuyển nhỏ dT_6 khi trước sự thay đổi dq_i của các khớp quay.

Trình tự giải:

Khi đã biết dq_i, theo phương trình (6.35) sẽ xác định:

$$^{T6}d = {}^{T6}d_x.i + {}^{T6}d_y.j + {}^{T6}d_z.k \qquad (6.36)$$

$$^{T6}\delta = {}^{T6}\delta_x.i + {}^{T6}\delta_y.j + {}^{T6}\delta_z.k \qquad (6.37)$$

Trên cơ sở (6.36), (6.37) và dùng (6.20) để xác định $^{T6}\Delta$, rồi sau đó tính $dT_6 = T_6\,{}^{T6}\Delta$.

Muốn vậy, trước hết phải xác định các phần tử trong từng cột của Jacobian ở phương trình (6.35). Các phần tử ở mỗi cột tương ứng với các vi phân độ di chuyển tịnh tiến và quay của mỗi khớp động.

Khi giải các bài toán động học ta đã dùng các phương trình quan hệ sau:

$$A_1^{-1}T_6 = {}^1T_6 \qquad (6.38)$$

$$A_2^{-1}A_1^{-1}T_6 = {}^2T_6 \qquad (6.39)$$

$$A_3^{-1}A_2^{-1}A_1^{-1}T_6 = {}^3T_6 \qquad (6.40)$$

$$A_4^{-1}A_3^{-1}A_2^{-1}A_1^{-1}T_6 = {}^4T_6 \qquad (6.41)$$

$$A_5^{-1}A_4^{-1}A_3^{-1}A_2^{-1}A_1^{-1}T_6 = {}^5T_6 \qquad (6.42)$$

Các cột tương ứng với các thành phần của $\frac{\partial T_6}{\partial q_i}$ theo (6.25) với $i = 1, \ldots 6$ tính từ cột 1 đến cột 6 và tương ứng sử dụng lần lượt T_6; $^1T_6$; $^2T_6$; $^3T_6$; $^4T_6$, và $^5T_6$ theo (6.28), (6.38 ÷ 6.42). Khi đó biết n_i, s_i, a_i và p_i từ các ma trận này ta sẽ tính các phần tử các cột của Jacobian theo các công thức (6.31) và (6.32).

Dưới đây là ví dụ minh họa phương pháp nói trên đối với trường hợp Robot Stanford. Trong Robot Stanford các ma trận A_i đã được xác định bằng (4.20), còn các ma trận $^iT_6$ đã được tính toán bằng các biểu thức từ (4.21) đến (4.27).

Cột thứ nhất của Jacobian tương ứng với các thành phần của $\frac{\partial T_6}{\partial q_1}$ với T_6, như đã biết, có thể biểu diễn như sau:

$$T_6 = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x & p_x \\ n_y & s_y & a_y & p_y \\ n_z & s_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (6.43)$$

Các phần tử trong ma trận T_6 đã được xác định bằng các biểu thức trong (4.27).

Trên cơ sở các phương trình (6.31) và (6.32) ta tính các phần tử của cột thứ nhất như sau:

$$\begin{aligned} {}^{T6}d_{1x} = &-\{C_1[C_2(C_4C_5C_6 - S_4S_6) - S_2S_5C_6] - S_1(S_4C_5C_6 + C_4S_6)\} \\ &\times \{S_1S_2d_3 + C_1d_2\} \\ &+ \{S_1[C_2(C_4C_5C_6 - S_4S_6) - S_2S_5C_6] + C_1(S_4C_5C_6 + C_4S_6)\} \\ &\times \{C_1S_2d_3 - S_1d_2\} \end{aligned} \qquad (6.44)$$

$$\begin{aligned} {}^{T6}d_{1y} = &-\{C_1[-C_2(C_4C_5S_6 + S_4C_6) + S_2S_5S_6] \\ &- S_1(-S_4C_5S_6 + C_4C_6)\} \\ &\times \{S_1S_2d_3 + C_1d_2\} \\ &+ \{S_1[-C_2(C_4C_5S_6 + S_4C_6) + S_2S_5S_6] \\ &\quad + C_1(-S_4C_5S_6 + C_4C_6)\} \\ &\times \{C_1S_2d_3 - S_1d_2\} \end{aligned} \qquad (6.45)$$

$$\begin{aligned} {}^{T6}d_{1z} = &-\{C_1(C_2C_4S_5 + S_2C_5) - S_1S_4S_5\}\{S_1S_2d_3 + C_1d_2\} \\ &+ \{S_1(C_2C_4S_5 + S_2C_5) + C_1S_4S_5\}\{C_1S_2d_3 - S_1d_2\} \end{aligned} \qquad (6.46)$$

$${}^{T6}\delta_{1x} = -S_2(C_4C_5C_6 - S_4S_6) - C_2S_5C_6 \qquad (6.47)$$

$${}^{T6}\delta_{1y} = S_2(C_4C_5S_6 + S_4C_6) + C_2S_5S_6 \qquad (6.48)$$

$${}^{T6}\delta_{1z} = -S_2C_4S_5 + C_2C_5 \qquad (6.49)$$

Rút gọn lại, ta có:

$$\frac{\partial T_6}{\partial q_1} = \begin{bmatrix} -d_2[C_2(C_4C_5C_6 - S_4S_6) - S_2S_5C_6] + S_2d_3(S_4C_5C_6 + C_4S_6) \\ -d_2[-C_2(C_4C_5S_6 + S_4C_6) + S_2S_5S_6] + S_2d_3(-S_4C_5S_6 + C_4C_6) \\ -d_2(C_2C_4C_5 + S_2C_5) + S_2d_3S_4S_5 \\ -S_2(C_4C_5C_6 - S_4S_6) - C_2S_5C_6 \\ S_2(C_4C_5S_6 + S_1C_6) + C_2S_5S_6 \\ -S_2C_4S_5 + C_2C_5 \end{bmatrix} \qquad (6.50)$$

Cột thứ i = 2 của Jacobian tương ứng với các thành phần của $\frac{\partial T_6}{\partial q_2}$, tính theo công thức (6.25) với ${}^1T_6$ đã xác định bằng (4.25) và tương tự như đã làm ở trên ta có:

$${}^{T6}d_{2x} = -\{C_2(C_4C_5C_6 - S_4S_6) - S_2S_5C_6\}\{-C_2d_3\}$$
$$+\{S_2(C_4C_5C_6 - S_4S_6) + C_2S_5C_6\}\{S_2d_3\} \qquad (6.51)$$

$${}^{T6}d_{2y} = -\{-C_2(C_4C_5C_6 + S_4C_6) + S_2S_5S_6\}\{-C_2d_3\}$$
$$+\{-S_2(C_4C_5C_6 + S_4C_6) - C_2S_5S_6\}\{S_2d_3\} \qquad (6.52)$$

$${}^{T6}d_{2z} = -\{C_2C_4S_5 + S_2C_5\}\{-C_2d_3\}$$
$$+\{S_2C_4S_5 - C_2C_5\}\{S_2d_3\} \qquad (6.53)$$

$${}^{T6}\delta_{2x} = S_4C_5C_6 + C_4S_6 \qquad (6.54)$$

$${}^{T6}\delta_{2y} = -S_4C_5S_6 + C_4C_6 \qquad (6.55)$$

$${}^{T6}\delta_{2z} = S_4S_5 \qquad (6.56)$$

Sau khi rút gọn, ta có:

$$\frac{\partial T_6}{\partial q_2} = \begin{bmatrix} d_3(C_4C_5C_6 - S_4S_6) \\ -d_3(C_4C_5C_6 + S_4C_6) \\ d_3C_4S_5 \\ S_4C_5C_6 + C_4S_6 \\ -S_4C_5S_6 + C_4C_6 \\ S_4S_5 \end{bmatrix} \qquad (6.57)$$

Cột thứ i = 3 của Jacobian tương ứng với các thành phần của $\frac{\partial T_6}{\partial q_3}$, tính theo công thức (25) với ${}^2T_6$ đã được xác định bằng (4.24) và tương tự như đã làm ở trên ta có:

$$\frac{\partial T_6}{\partial d_3} = \begin{bmatrix} -S_5C_6 \\ S_5S_6 \\ C_5 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \qquad (6.58)$$

Cột thứ i = 4 của Jacobian tương ứng với các thành phần của $\frac{\partial T_6}{\partial q_4}$, tính theo công thức (6.25) với ${}^3T_6$ đã được xác định bằng (4.23) và tương tự như đã làm ở trên ta có:

$$\frac{\partial T_6}{\partial q_4} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -S_5C_6 \\ S_5S_6 \\ C_5 \end{bmatrix} \tag{6.59}$$

Tương tự, đối với trường hợp cột thứ i = 5, với ${}^4T_6$ theo công thức (4.22) ta có:

$$\frac{\partial T_6}{\partial q_5} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ S_6 \\ C_6 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{6.60}$$

Cuối cùng, đối với trường hợp cột thứ i = 6, với ${}^5T_6$ theo công thức (4.21) ta có:

$$\frac{\partial T_6}{\partial q_6} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \tag{6.61}$$

Ví dụ 3:

Robot Stanford đang ở trạng thái cấu hình sau:

$$T_6 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 20 \\ 1 & 0 & 0 & 6.0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$ tương ứng, các toạ độ có các giá trị sau:

$q_1 = 0^0$, $q_2 = 90^0$, $d_3 = 2$mm, $q_4 = 0^0$, $q_5 = 90^0$, $q_6 = 90^0$ còn $d_2 = 6$mm. Hãy xác

định ma trận Jacobian và tính toán giá trị độ di chuyển nhỏ dT_6 của bàn kẹp khi các khớp có độ di dịch như sau:

$$dq_i = \begin{bmatrix} 0.1 \\ -0.1 \\ 2.0 \\ 0.1 \\ 0.1 \\ 0.1 \end{bmatrix}$$

Giải:

Xác định phần tử của các cột của Jacobian theo các công thức (6.60) và từ (6.57) đến (6.61):

$$\frac{\partial T_6}{\partial q_i} = \begin{bmatrix} 20.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ -6.0 & 0.0 & 1.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 20.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 1.0 & 0.0 & 0.0 & 1.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 1.0 & 0.0 & 0.0 \\ -1.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 1.0 \end{bmatrix}$$

Vị trí và hướng của bàn kẹp đã được vi chỉnh như sau:

$$\begin{bmatrix} 2.0 \\ 1.4 \\ -2.0 \\ 0.0 \\ 0.1 \\ 0.0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 20.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ -6.0 & 0.0 & 1.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 20.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 1.0 & 0.0 & 0.0 & 1.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 1.0 & 0.0 & 0.0 \\ -1.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 1.0 \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} 0.1 \\ -0.1 \\ 2.0 \\ 0.1 \\ 0.1 \\ 0.1 \end{bmatrix}$$

Như vậy:

$$^{T6}d = 2.0i + 1.4j - 2.0k$$

$$^{T6}\delta = 0.0i + 0.1j + 0.0k$$

Theo công thức (6.20), ta có

$$
{}^{T6}\Delta = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.1 & 2.0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.4 \\ -0.1 & 0 & 0 & -2.0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}
$$

Và nhân T_6 với ${}^{T6}\Delta$, ta có:

$$
dT_6 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 20 \\ 1 & 0 & 0 & 6.0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.1 & 2.0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.4 \\ -0.1 & 0 & 0 & -2.0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}
$$

$$
dT_6 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1.4 \\ 0 & 0 & 0.1 & 2.0 \\ 0.1 & 0 & 0 & 2.0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}
$$

6.6. jacobian nghịch đảo

Phương trình (6.35) có thể viết gọn lại dưới dạng ma trận sau:

$$
D = J.\,Q \qquad (6.62)
$$

trong D và Q là 2 ma trận 1 cột:

$$
D = \begin{bmatrix} {}^{T6}d_x \\ {}^{T6}d_y \\ {}^{T6}d_z \\ {}^{T6}\delta_x \\ {}^{T6}\delta_y \\ {}^{T6}d_z \end{bmatrix}, \qquad Q = \begin{bmatrix} dq_1 \\ dq_2 \\ dq_3 \\ dq_4 \\ dq_5 \\ dq_6 \end{bmatrix}
$$

còn Jacobian J là ma trận 6x6 đã được mô tả trong (6.35).

Bài toán ở đây đặt ra như sau:

Cho biết sự thay đổi nhỏ về định vị và định hướng của T_6 biểu thị bằng ma trận D. Cần xác định bộ giá trị dq_i ở các khớp động.

Lời giải có thể xác định từ phương trình (6.62):

$$Q = J^{-1} D \quad (6.63)$$

Tuy nhiên việc tìm lời giải này nhiều khi rất phức tạp, do bản thân tính phức tạp của các phần tử Jacobian và do chứa đựng nhiều phép tính đại số và lượng giác đa trị v.v.

Ngoài ra, còn có phương pháp xác định dq_i trên cơ sở lấy vi phân các lời giải tương ứng của bài toán động học ngược robot.

CHƯƠNG VII

LẬP TRÌNH QUỸ ĐẠO CHUYỂN ĐỘNG VÀ MÔ PHỎNG CÁC HOẠT ĐỘNG CỦA ROBOT.

7.1. GIỚI THIỆU CHUNG VỀ LẬP TRÌNH CHO ROBOT

Khi xem xét vấn đề lập trình cho robot, không những cần quan tâm đến các chuyển động của bản thân robot mà còn phải lưu ý đến sự hoạt động của cả hệ thống sản xuất, mà robot là một thành viên.

Hệ thống sản xuất gồm nhiều đơn nguyên hoặc môđun thiết bị sản xuất (workcell). Đó là một cụm các thiết bị, bao gồm một hoặc một vài robot, máy công tác hoặc băng chuyền, các cơ cấu cấp thoát phôi hoặc đồ gá phụ trợ khác v.v... Thông thường để lập trình điều khiển robot trước hết phải mô phỏng sự hoạt động của nó trong một " workcell" cụ thể.

Có thể phân tách thành 2 phương pháp lập trình: lập trình trực tuyến (on - line programming) và lập trình ngoại tuyến (off - line programming).

Khi *lập trình trực tuyến*, người vận hành robot trực tiếp tiến hành lập trình trên bản thân robot hoặc thiết bị phụ trợ kèm theo. Có phương pháp lập trình thủ công (manual input), phương pháp lập trình theo kiểu dạy học bằng cách dẫn dắt (teach by lead through) và phương pháp lập trình theo kiểu dạy học bằng thiết bị dạy học gọi là "teach pendant".

Lập trình thủ công là phương pháp đơn giản nhất và thích hợp nhất với các loại robot không được trang bị thiết bị trợ động (non - servo - controlled robots), không có tín hiệu phản hồi. Để lập phương trình có thể dùng các cữ tỳ, cơ cấu cam, bảng ổ cắm điện, các công tắc hành trình v.v... Các loại này tuy đơn giản nhưng lại có nhiều ứng dụng. Thực tiễn sản xuất đã chứng tỏ rằng có thể chế tạo ra những chương trình thao tác không đơn giản bằng cách thức đơn giản đó.

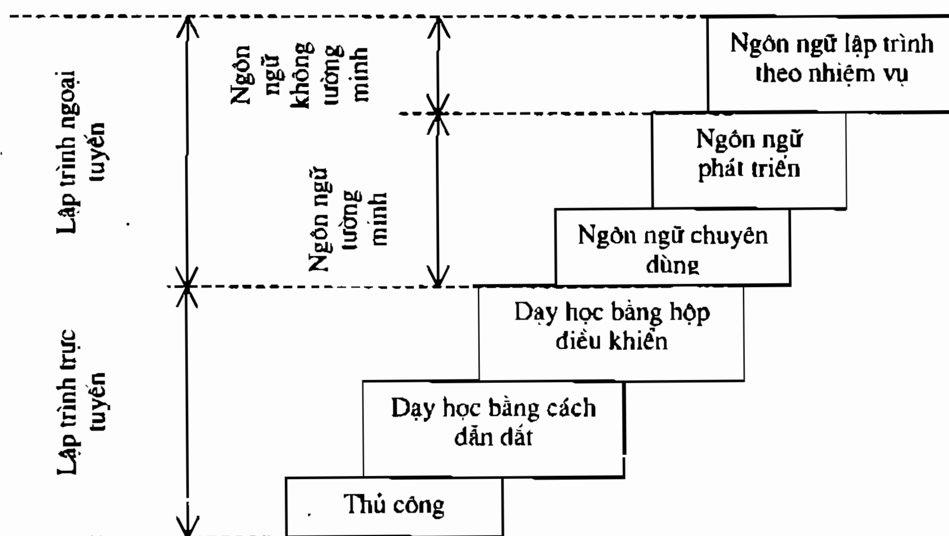
Phương pháp dẫn dắt để "dạy học" cho robot có thể thực hiện được những công việc tinh tế hơn. Người vận hành dẫn dắt robot làm các thao tác theo yêu cầu và ở những vị trí cần thiết, các tín hiệu được nhận biết từ các cảm biến (sensor) lắp trên robot sẽ được ghi lại. Khi làm việc,

các thông tin tín hiệu đã ghi nhớ này sẽ tác động vào cơ cấu chấp hành làm cho robot hoàn toàn lặp lại một cách tự động các thao tác đã "học" được.

Có thể "dạy học" cho robot theo phương pháp dùng hộp điều khiển "teach pendant". Đó là một hộp nhỏ cầm tay có các nút bấm điều khiển. Khi bấm các nút điều khiển này, các khớp động của robot chuyển dịch một đại lượng nào đó theo ý người điều khiển và các giá trị đó được ghi lại để lập trình khi chuyển sang chế độ tự động.

Trên hình 7.1 biểu thị các phương pháp lập trình kể trên như các bước phát triển hiện đại dần. Lập trình ngoại tuyến là một bước phát triển cao hơn về chất.

Lập trình ngoại tuyến (off - line programming) không tiến hành trực tiếp trên thiết bị robot, mà tiến hành gián tiếp trên máy tính. Để thực hiện được việc trao đổi thông tin giữa người và robot phải dùng đến ngôn ngữ mà cả hai đều hiểu được. Các ngôn ngữ chương trình là ngôn ngữ tường minh (explicit languages) cho phép người lập trình truyền tín hiệu cho máy công tác thực hiện các thao tác cần thiết.



Hình 7.1. *Sự phát triển các phương pháp và ngôn ngữ lập trình*

Máy tính là một thiết bị vạn năng, tổ hợp các lệnh để máy hoàn thành các công việc rất đa dạng. Ngôn ngữ máy cho phép dùng các ngôn ngữ bậc cao, gọi là ngôn ngữ phát triển. Trong tin học có nhiều loại ngôn ngữ. Tuy nhiên trong điều khiển nói chung và điều khiển robot nói riêng cần quan tâm tới sự tiện lợi và nhanh chóng để đảm bảo thời gian thực. Vì

thế xuất hiện nhiều loại ngôn ngữ chuyên dụng, định hướng cho một loại vấn đề nào đó.

Như vậy khi lập trình ngoại tuyến đều cần dùng đến ngôn ngữ lập trình. Mức thông thường dùng các ngôn ngữ tường minh (explicit language). Mức cao hơn là dùng ngôn ngữ không tường minh (implicit language).Đó là mức dùng ngôn ngữ lập trình theo nhiệm vụ (task - level programming language). Những ngôn ngữ này cho phép người sử dung ra lệnh để robot thực hiện các công việc mong muốn một cách trực tiếp mà không cần chı ra chi tiết các hoạt động của robot như các ngôn ngữ lập trình thông thường. Như sơ đồ trên hình 7.1, đây là mức thứ 3 của phương thức lập trình ngoại tuyến. Ví dụ, ngôn ngữ AML của hãng IBM, Karel của hãng General Motor, Fanuc, Rail của tập đoàn Automatix, Jars của NASA và RPL của SRI International. Các ngôn ngữ này còn đang ở giai đoạn phát triển.

Ở phạm vi ứng dụng ngôn ngữ tường minh cũng có 2 mức:

- Ngôn ngữ robot chuyên dụng.

Những ngôn ngữ lập trình này được xây dựng như một ngôn ngữ mới. Cú pháp (syntax) và ngữ nghĩa (sematics) của các ngôn ngữ này cần phải rất đơn giản vì người lập trình cho các ứng dụng công nghiệp không phải là chuyên gia về lập trình. Ví dụ, ngôn ngữ VAL 2 của Unimation, AL của Đại học Standford.

- Ngôn ngữ phát triển.

Ngôn ngữ này tạo ra các thư viện robot cho một ngôn ngữ lập trình bậc cao đã có sẵn. Những ngôn ngữ lập trình robot này được xây dựng bằng cách dựa trên các ngôn ngữ lập trình bậc cao thông dụng (ví dụ như Pascal) và thêm vào một thư viện các thủ tục về hàm đặc biệt dùng cho robot. Khi viết chương trình Pascal để điều khiển robot, người sử dụng gọi các hàm hoặc các thủ tục đã định nghĩa trước trong thư viện để xử lý các nội dung có liên quan đến việc tính toán hoặc điều khiển robot.

Ví dụ, PASRO (Pascal for robot) là một thư viện dùng cho lập trình robot, cung cấp nhiều thủ tục và hàm đặc biệt để tính toán và điều khiển robot dùng trong môi trường ngôn ngữ Turbo Pascal, hoặc PASRO/C là phát triển của PASRO, nhưng được viết trên cơ sở ngôn ngữ Turbo C.

7.2. MÔ TẢ CÁC VẬT THỂ VÀ NHIỆM VỤ.

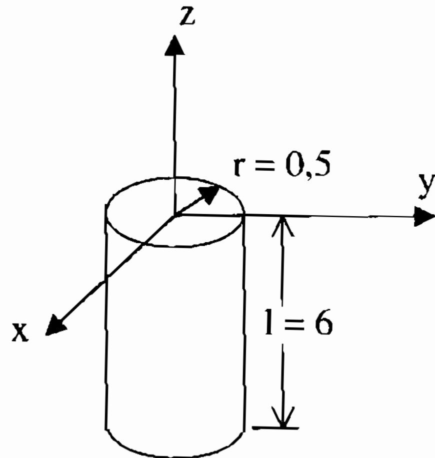
7.2.1. Mô tả các vật thể

Các vật thể gọi là các đối tác của robot trong công việc và các thiết bị và đồ vật trong môi trường làm việc. Chúng rất đa dạng và phong phú. Tuy nhiên có thể dựa vào các khối hình cơ bản sau đây để mô tả chúng:

- Khối hình vật thể tròn xoay (rotative).

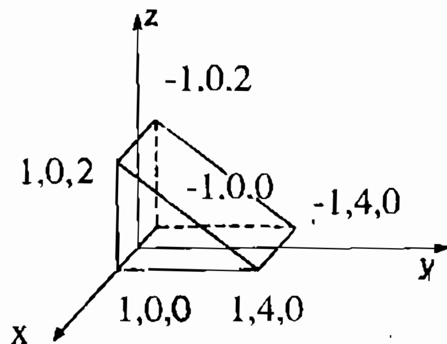
- Khối hình vật thể lăng trụ (prismatic).

Các vật thể có cấu trúc hỗn hợp (combination) có thể mô tả bằng cách ghép nối các khối hình cơ bản.



Hình 7.2. *Mô tả chi tiết hình trụ*

Khối hình vật thể xoay tròn được đặc trưng bằng toạ độ tâm và bán kính của hình tròn các tiết diện. Ví dụ, trên hình 7.2 mô tả một chi tiết máy hình trụ bán kính r = 0,5, chiều dài l = 6; nằm dọc theo trục z.



Hình 7.3. *Mô tả vật thể hình đa diện*

Khối hình vật thể đa diện được đặc trưng bằng toạ độ các điểm góc cạnh của nó.

Khi mô tả các vật thể trong môi trường làm việc, cũng như khi mô tả quá trình thao tác của robot và dịch chuyển các đối tác, có thể dùng các phép biến đổi thuần nhất.

Xét ví dụ sau đây:

Cho một vật thể hình đa diện trong hệ toạ độ cơ sở xyz như hình 7.3. Có thể lập một ma trận mà mỗi cột là véctơ mở rộng biểu thị một điểm góc của tam trụ. Cụ thể đối với hình 7.3 có 6 điểm góc, ta có:

① ② ③ ④ ⑤ ⑥

$$V = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & 4 \\ 0 & 0 & 2 & 2 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (7.1)$$

Thực hiện phép biến đổi:

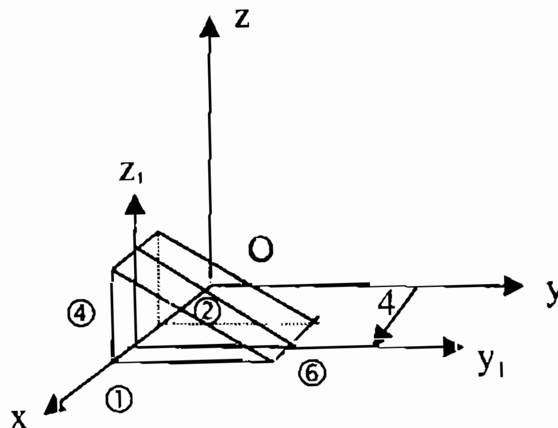
$$H = T_p(4,0,0) \,.\, R(y, 90^0) \,.\, R(x, 90^0) \quad (7.2)$$

sẽ lần lượt nhận được các kết quả sau:

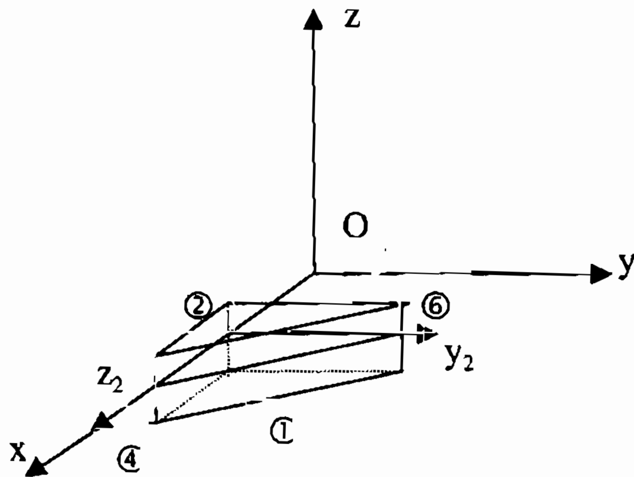
- Tịnh tiến vật thể dọc theo trục x một đoạn bằng 4 đơn vị tương ứng với phép biến đổi $H_1 = T_p\,(4,0,0)$,hình 7.4.

- Rồi cho vật thể quay quanh trục y góc 90^0 và kết quả của hai phép biến đổi trên $H_2 = T_p\,(4,0,0).\ R(y,90^0)$,hình 7.5.

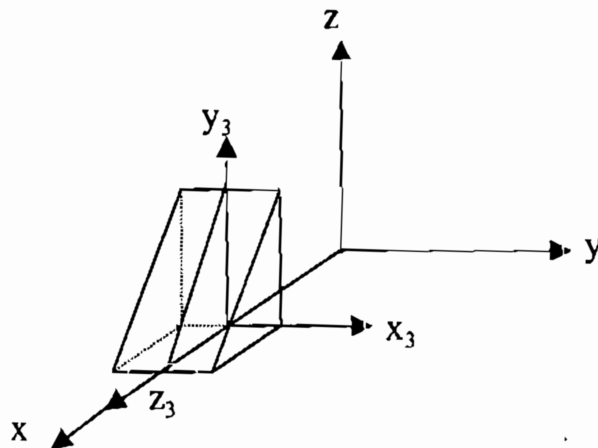
- Tiếp tục quay vật thể quanh trục z góc 90^0 và kết quả của phép biến đổi H theo (7.2),hình 7.6.



Hình 7.4. *Vật thể sau phép biến đổi $H_1 = T_p\,(4,0,0)$*



Hình 7.5. *Vật thể sau các phép biến đổi $H_2 = T_p(4,0,0).\ R(y,90^0)$*



Hình 7.6. *Vật thể sau các phép biến đổi $H = T_p(4,0,0)\ .\ R(y,90^0)\ .\ R(x,90^0)$*

Ma trận H theo biểu thức (7.2) có thể xác định bằng tích các ma trận quen biết đối với các phép biến đổi cơ bản nói trên, ta có:

$$H = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 4 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \qquad (7.3)$$

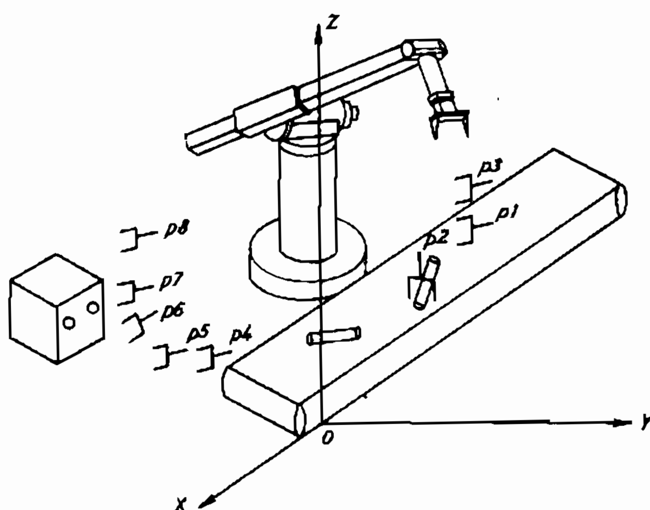
Như vậy dễ dàng xác định ma trận V' biểu thị vật thể sau các phép biến đổi (7.2)

$$V' = H\,.\,V = \begin{bmatrix} 4 & 4 & 6 & 6 & 4 & 4 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & 4 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \qquad (7.4)$$

① ② ③ ④ ⑤ ⑥

7.2.2. Mô tả nhiệm vụ.

Nhiệm vụ giao cho robot thực hiện thường được mô tả bằng các thao tác chuyển dịch. Có thể tìm hiểu nội dung này thông qua một ví dụ cụ thể [12] như trình bày trên hình vẽ 7.7. Ở đây robot lấy trên băng chuyền các chiếc chốt hình trụ đã được mô tả trên hình 7.2, để lắp vào các lỗ trong thân máy hình hộp.



Hình 7.7. *Mô tả nhiệm vụ*

Nhiệm vụ nói trên có thể mô tả bằng một dãy liên tiếp các vị trí thao tác sau đây:

p_1: Hướng tới chốt

p_2: Kẹp vào chốt

Kẹp chặt chốt

p_3: Nâng cao chốt

p_4: Hướng tới lỗ với các góc nghiêng nào đó

p_5: Dừng lại khi chạm vào lỗ

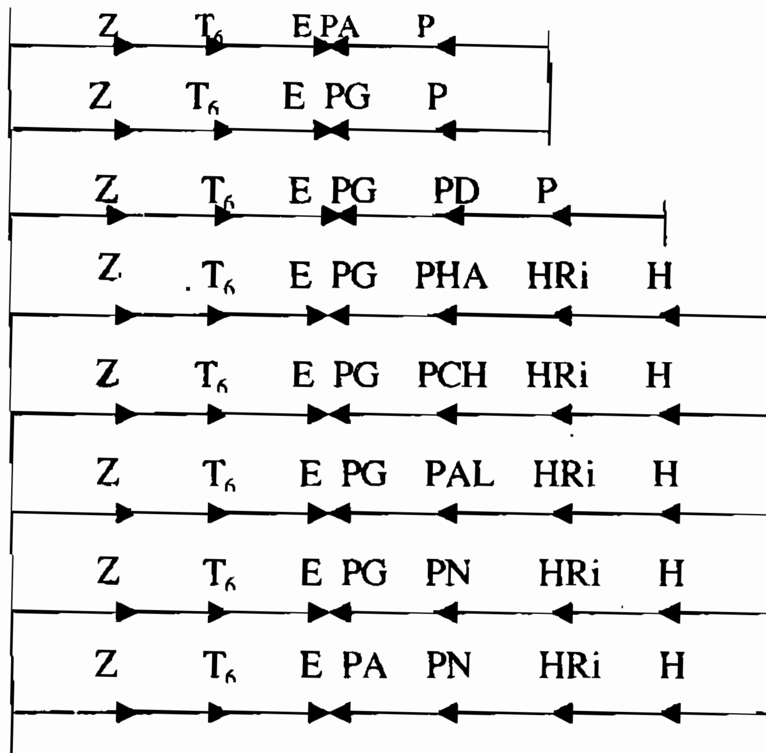
p_6: Điều chỉnh lại hướng góc nghiêng

p_7: Lắp chặt vào lỗ

Nhả chốt ra

p_8: Rời đi.

Dùng phương pháp toán đồ chuyển đổi (xem phần 4.5 chương IV) để mô tả nhiệm vụ tại các vị trí thao tác nói trên, như trình bày trên hình 7.8.



Hình 7.8. *Toán đồ chuyển đổi mô tả nhiệm vụ tại các vị trí*

Tương ứng:

p_1: $ZT_6E = P\ PA$ (7.5)

p_2: $ZT_6E = P\ PG$ (7.6)

p_3: $ZT_6E = P\ PD\ \ PG$ (7.7)

p_4: $ZT_6E = H\ HRi\ PHA\ \ PG$ (7.8)

p_5: $ZT_6E = H\ HRi\ PCH\ \ PG$ (7.9)

p_6: $ZT_6E = H\ HRi\ PAL\ \ PG$ (7.10)

p_7: $ZT_6E = H\ HRi\ PN\ \ PG$ (7.11)

p_8: $ZT_6E = H\ HRi\ PN\ \ PA$ (7.12)

Trong đó ở mỗi vị trí thao tác được mô tả bằng ZT_6E (xem hình 4.11) với:

Z - Mô tả vị trí trạng thái của robot trong hệ toạ độ gốc nào đó.

T_6 - Mô tả vị trí trạng thái của điểm cuối của cánh tay robot trong hệ toạ độ cố định gắn với giá đỡ của robot.

E - Mô tả vị trí trạng thái điểm cuối của công cụ kèm theo.

Nói đến vị trí trạng thái là nói đến vị trí và hướng của hệ toạ độ gắn với vị trí đang khảo sát. Với cách mô tả đó, khi mô tả vị trí robot thì chỉ cần thay đổi Z và khi thay đổi dụng cụ thao tác thì chỉ cần thay đổi E.

Để mô tả cấu trúc về nhiệm vụ, ở đây cũng dùng các phép biến đổi tương ứng sau đây:

P - Mô tả vị trí trạng thái của chiếc chốt trong hệ toạ độ gốc.

PA - Mô tả vị trí trạng thái của bàn kẹp đang hướng tới chốt.

PG - Mô tả vị trí trạng thái của bàn kẹp đang kẹp chốt so với chốt.

PD - Mô tả vị trí trạng thái của bàn kẹp bắt đầu mang chốt đi.

H Mô tả vị trí trạng thái của hộp thân máy có hai lỗ.

HRi - Mô tả vị trí trạng thái của lỗ thứ i trong hộp thân máy so với hệ toạ độ H.

PHA - Mô tả vị trí trạng thái của chốt đang hướng tới lỗ thứ i.

PCH - Mô tả vị trí trạng thái của chốt khi chạm vào lỗ.

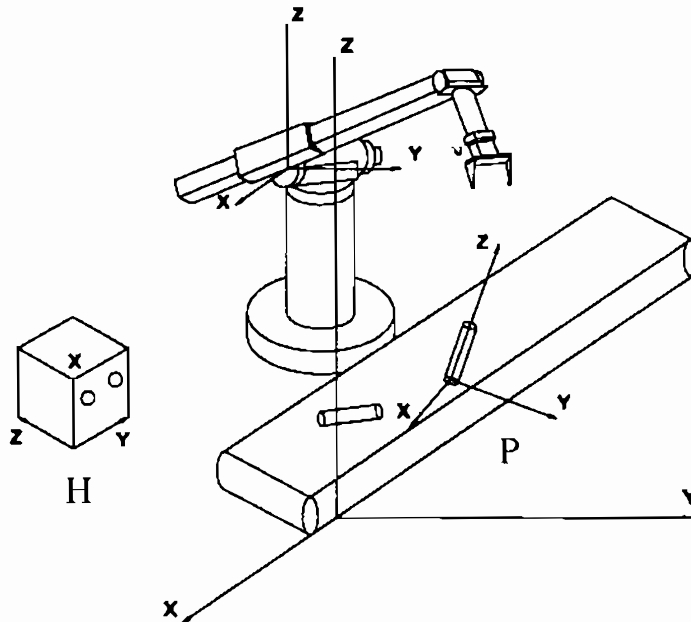
PAL - Mô tả vị trí trạng thái lúc bắt đầu được lắp vào lỗ.

PN - Mô tả vị trí trạng thái của chốt khi đã lắp vào lỗ.

Việc thực hiện các nhiệm vụ trên có thể trở nên phức tạp hơn nếu trong đó ngoài những bước đi xác định, ví dụ như HRi hoàn toàn có thể

xác định từ bản vẽ kỹ thuật, còn có các bước đi khác cần thông tin để hiệu chỉnh. Trong trường hợp này thường sử dụng kết hợp với các biện pháp khác, ví dụ, phương pháp dạy học cho robot.

Trên hình 7.9 trình bày 3 hệ toạ độ Z, P và H gắn liền tương ứng với robot, chiếc chốt và thân hộp có hai lỗ .



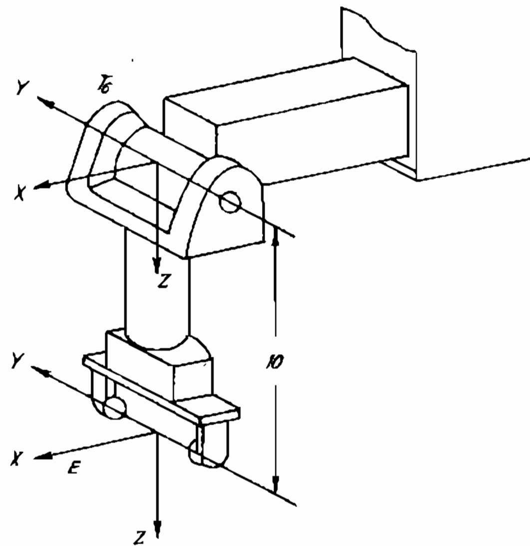
Hình 7.9. *Các hệ tọa độ Z, P và H*

Thiết lập quan hệ của các hệ toạ độ Z, P và H với nhau và với các hệ toạ độ gốc. Ví dụ, trong hệ toạ độ gốc nếu chọn gốc của hệ Z ở toạ độ x = -30, y = 0, z = 50 như trên hình 7.9, ta có:

$$Z = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -30 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 50 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \qquad (7.13)$$

Trên hình 7.10 có 2 hệ toạ độ: T_6 gắn với điểm cuối của cánh tay robot và E gắn với tâm của bàn kẹp. Điểm gốc của hệ E nằm ở vị trí (0,0,10) trong hệ toạ độ T_6. Do vậy, ta có:

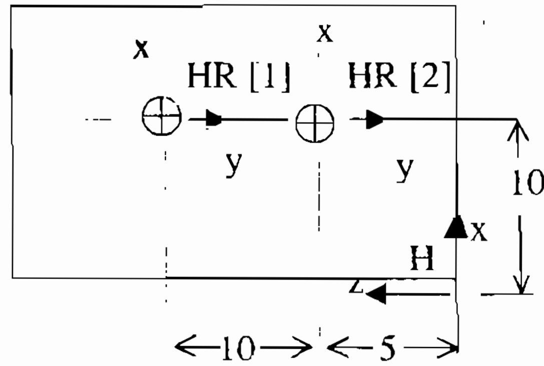
$$^{T_6}E = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 10 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (7.14)$$



Hình 7.10. *Các hệ tọa độ T_6 và E*

Trên hình 7.11 trình bày cách bố trí các hệ toạ độ: H gắn với hộp thân máy. HR_i gắn với các lỗ. Theo đó, ta có:

$$HR_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 10 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 15 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad ; \quad HR_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 10 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (7.15)$$

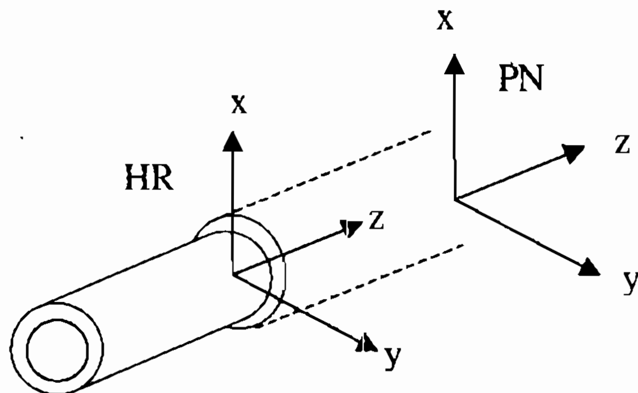


Hình 7.11. *Hộp thân máy và các hệ tọa độ*

Hình 7.12 mô tả vị trí trạng thái khi chốt đã lắp vào lỗ. Khi đó trục Z của chốt phải trùng với đường trục của lỗ. Vì chốt có hình trụ tròn đối xứng nên phương của các trục x và y có thể tuỳ ý. Chọn phương trục x thẳng đứng, tức là giữ nguyên như phương thẳng đứng lúc chốt từ vị trí nằm ở băng tải vừa được nâng lên. Vậy vị trí trạng thái của chốt khi đã lắp vào lỗ có độ sâu là 4 được mô tả bởi ma trận chuyển đổi sau so với HR:

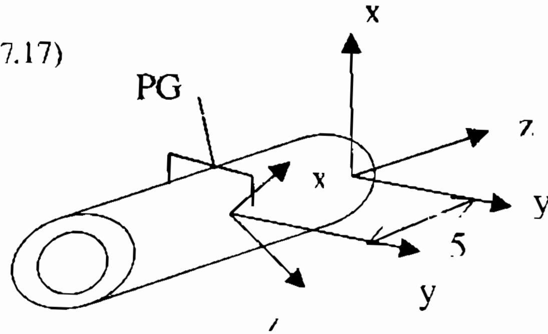
$$PN = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7.16)$$

Hình 7.13 mô tả vị trí bàn kẹp trên chiếc chốt, còn ma trận chuyển đổi sau đây mô tả vị trí trạng thái của bàn kẹp chốt so với chốt:



Hình 7.12. *Chốt lắp vào lỗ.*

$$PG=\begin{bmatrix} .7 & 0 & -.7 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ .7 & 0 & .7 & -5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7.17)$$



Hình 7.13. *Chốt lắp vào lỗ*

Tiếp theo xác định các ma trận chuyển đổi khác từ các quan hệ cấu trúc ở các vị trí thao tác khác nhau của robot như đã được mô tả ở trên.

Ứng với vị trí p_1 (7.5) tức là lúc bàn kẹp hướng tới chốt:

$$ZT_6E = P\,PA$$

Từ đó:

$$PA = P^{-1}\,ZT_6E \qquad (7.18)$$

Ứng với vị trí p_2 (7.6) tức là lúc bàn kẹp kẹp chặt chốt:

$$ZT_6E = P\,PG$$

Từ đó:

$$P = ZT_6E\,PG^{-1} \qquad (7.19)$$

Ứng với vị trí p_3 (7.7) tức là lúc nâng cao chốt:

$$ZT_6E = P\,PD\,PG$$

Từ đó:

$$PD = P^{-1}\,ZT_6E\,PG^{-1} \qquad (7.20)$$

Ứng với vị trí p_4 (7.8), tức là lúc hướng tới lỗ:

$$ZT_6E = H\,HR_1\,PHA\,PG$$

Từ đó:

$$PHA = (H\,HR_1)^{-1}\,ZT_6E\,PG^{-1} \qquad (7.21)$$

Ứng với vị trí p_5 (7.9), tức là lúc dừng lại khi chạm vào lỗ:

$$ZT_6E = H\ HR_i\ PCH\ PG$$

Từ đó:

$$PCH = (H\ HR_i)^{-1}\ ZT_6E\ PG^{-1} \qquad (7.22)$$

Ứng với vị trí p_6 (7.10), tức là lúc điều chỉnh hướng góc nghiêng

$$ZT_6E = H\ HR_i\ PAL\ PG$$

Từ đó:

$$PAL = (H\ HR_i)^{-1}\ ZT_6E\ PG^{-1} \qquad (7.23)$$

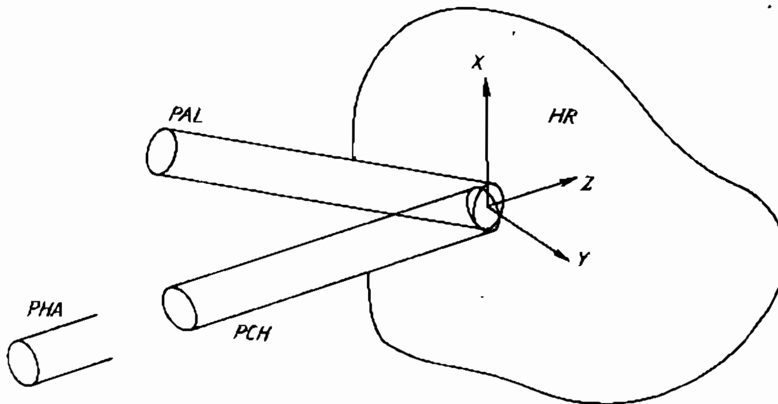
Hình 6.14 minh hoa các vị trí thao tác p_4, p_5, và p_6

Ứng với vị trí p_7..(7.11), tức là lúc lắp chốt vào lỗ:

$$ZT_6E = H\ HR_i\ PN\ PG$$

Từ đó:

$$H = ZT_6E\ (HR_i\ PN\ PG)^{-1} \qquad (7.24)$$



Hình 7.14. *Các vị trí thao tác p_4, p_5, và p_6.*

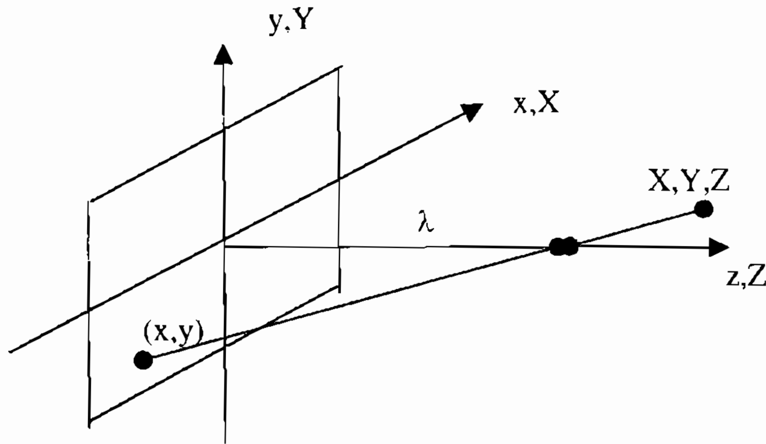
7.3. HỆ THỐNG ROBOT LÀM VIỆC VỚI CAMERA.

7.3.1 Biến đổi chiếu hình.

Biến đổi chiếu hình là phép biến đổi quang học để chiếu các điểm trong không gian 3 chiều lên một mặt phẳng. Phép biến đổi này rất cần

thiết khi trao đổi thông tin giữa các vật thể 3 chiều và hình chiếu của nó trên các mặt phẳng.

Trên hình 7.15 mô tả sơ đồ phép chiếu quang học.



Hình 7.15. *Sơ đồ hệ thống chiếu hình*

Hệ toạ độ x,y,z gắn liền với camera và mặt phẳng xy là mặt phẳng chiếu, trục z trùng với trục chính qua tâm thấu kính. Như vậy gốc của hệ toạ độ xyz qua tâm của mặt phẳng chiếu, còn tâm thấu kính có toạ độ là (o,o,λ) với λ là khoảng cách tiêu cự. Ở đây, hệ toạ độ x,y,z trùng với hệ toạ độ cơ bản X,Y,Z.

Giả sử X,Y,Z là toạ độ của một điểm bất kỳ trong không gian 3 chiều. Nếu Z > λ, tức là trường hợp vật thể đang quan sát nằm trước thấu kính, từ các quan hệ giữa các hình tam giác trên hình 7.15 ta có:

$$\frac{x}{\lambda} = -\frac{X}{Z-\lambda} = \frac{X}{\lambda - Z} \qquad (7.25)$$

$$\frac{y}{\lambda} = -\frac{Y}{Z-\lambda} = \frac{Y}{\lambda - Z} \qquad (7.26)$$

Từ đó:

$$x = \frac{\lambda X}{\lambda - Z} \qquad (7.27)$$

$$y = \frac{\lambda Y}{\lambda - Z} \qquad (7.28)$$

Lưu ý rằng các phương trình trên là phi tuyến tính vì còn tồn tại phép chia cho Z. Ở đây cũng có thể dùng ma trận thuần nhất 4x4 để mô ta sự biến đổi chiếu hình. Tuy nhiên sự khác biệt cơ bản so với khi dùng các phép biến đổi khác trước đây (xem chương III) là sự không tuyến tính nói trên.

Một điểm M bất kỳ có thể xác định bằng véctơ **r** trong hệ toạ độ X,Y,Z:

$$\mathbf{r} = (X, Y, Z)^T \qquad (7.29)$$

Còn ở trong không gian toạ độ thuần nhất (homogeneous coordinate), điểm M có thể xác định bằng một véctơ mở rộng **r**:

$$\tilde{\mathbf{r}} = (kX, kY, kZ, k)^T \qquad (6.30)$$

Như đã trình bày trong chương III, k là hệ số tỷ lệ có giá trị khác số không và khi k = 1 thì các toạ độ biểu diễn bằng toạ độ có thực. Như vậy, để xác định toạ độ thực của điểm M chia 3 thành phần đầu của vectơ mở rộng (7.30) cho thành phần thứ 4:

Ma trận biến đổi chiếu hình có thể xác định như sau:

$$A_c = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{\lambda} & 1 \end{bmatrix} \qquad (7.31)$$

Vậy tích của A_c $\tilde{\mathbf{r}}$ là một vectơ $\tilde{\mathbf{r}}_c$

$$\tilde{\mathbf{r}}_c = A_c\tilde{\mathbf{r}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{\lambda} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} kX \\ kY \\ kZ \\ k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} kX \\ kY \\ kZ \\ -\frac{kZ}{\lambda} + k \end{bmatrix} \qquad (7.32)$$

Các thành phần của véctơ mở rộng $\widetilde{\mathbf{r}}_c$ là toạ độ của camera trong không gian toạ độ thuần nhất. Để xác định các thành phần thực trong hệ tọa độ gắn liền với camera. tức là các thành phần của véctơ $\mathbf{r}_c$ (x,y,z) chia 3 thành phần đầu của véctơ mở rộng $\widetilde{\mathbf{r}}_c$ cho thành phần thứ 4, ta có:

$$\mathbf{r}_c = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{\lambda X}{\lambda - Z} \\ \dfrac{\lambda Y}{\lambda - Z} \\ \dfrac{\lambda Z}{\lambda - Z} \end{bmatrix} \tag{7.33}$$

Đối chiếu với (7.27) và (7.28) nhận thấy hai thành phần đầu của véctơ $\mathbf{r}_c$ chính là hình chiếu của điểm M (X,Y,Z) lên mặt phẳng chiếu của camera. Thành phần thứ 3 không tồn tại trên mặt phẳng chiếu và là biến số tự do khi biến đổi ngược.

Biến đổi ngược khi chiếu hình là phép biến đổi các điểm từ hình chiếu trên mặt phẳng chiếu thành các điểm tương ứng trong không gian 3 chiều, từ phương trình (7.32), ta có:

$$\widetilde{\mathbf{r}} = A_c^{-1}\widetilde{\mathbf{r}} \tag{7.34}$$

với:

$$A_c^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \dfrac{1}{\lambda} & 1 \end{bmatrix} \tag{7.35}$$

Giả sử rằng (x_0,y_0,0) là toạ độ của điểm đang xét trên hình chiếu. Giá trị 0 theo toạ độ Z chứng tỏ rằng mặt phẳng chiếu nằm ở toạ độ Z = 0. Có thể biểu diễn điểm này trong không gian toạ độ thuần nhất.

$$\widetilde{\mathbf{r}}_c = (kx_0, ky_0, o, k)^T \tag{7.36}$$

Thay vào (6.34) ta có:

$$\widetilde{\mathbf{r}} = (kx_0, ky_0, o, k)^T \tag{7.37}$$

và trong hệ toạ độ X,Y,Z ta có:

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_o \\ y_o \\ o \end{bmatrix} \tag{7.38}$$

Đây là trường hợp không chỉ là hình chiếu của một điểm mà là của tất cả các điểm trong không gian X, Y, Z nằm trên cùng một đường thẳng - đường thẳng đi qua các điểm (x_o, y_o, o) và (o, o, λ). Như vậy từ (7.27) và (7.28) ta có phương trình của đường thẳng này trong hệ toạ độ X,Y,Z, như sau:

$$X = \frac{x_o}{\lambda}(\lambda - Z) \tag{7.39}$$

$$Y = \frac{Y_o}{\lambda}(\lambda - Z) \tag{7.40}$$

Rõ ràng là nếu chỉ biết toạ độ hình chiếu của một điểm (x_o, y_o) trên mặt phẳng chiếu thì chưa đủ để xác định vị trí của điểm đó trong không gian 3 chiều, mà cần phải bổ sung thêm thông tin khác, ví dụ, toạ độ Z. Bởi thế thành phần thứ 3 của véctơ $\mathbf{r}_c$ phải là biến số tự do thay vì số o (xem 7.36) tức là:

$$\tilde{\mathbf{r}}_c = \begin{bmatrix} kx_o \\ ky_o \\ kz \\ k \end{bmatrix} \tag{7.41}$$

và thay vào (6.35) ta có:

$$\tilde{\mathbf{r}}_c = \begin{bmatrix} kx_o \\ ky_o \\ kz \\ \frac{kz}{\lambda} + k \end{bmatrix} \tag{7.42}$$

Sau khi chia 3 thành phần đầu của véctơ mở rộng **r** cho thành phần thứ 4 để biến đổi về toạ độ X,Y,Z ta có:

$$X = \frac{\lambda x_o}{\lambda + z} \tag{7.43}$$

$$Y = \frac{\lambda y_o}{\lambda + z} \tag{7.44}$$

$$Z = \frac{\lambda z_o}{\lambda + z} \tag{7.45}$$

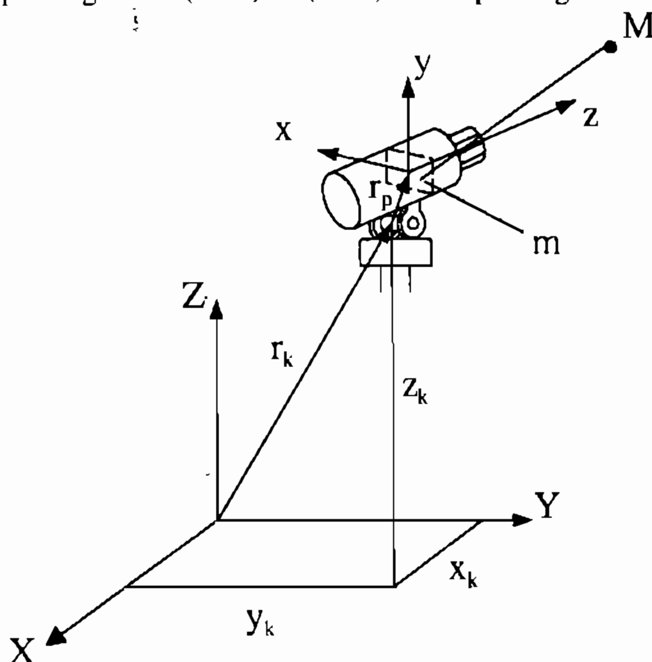
Từ (6.45) rút ra Z và thay vào (6.43) và (6.44), ta có:

$$X = \frac{x_o}{\lambda}(\lambda - Z) \tag{7.46}$$

$$Y = \frac{y_o}{\lambda}(\lambda - Z) \tag{7.47}$$

7.3.2. Các phương trình cơ bản của hệ thống camera.

Các phương trình (7.32) và (7.33) là các phương trình cơ bản của hệ



Hình 7.16. *Sơ đồ bố trí hệ thống camera*

thống camera. Tuy nhiên khi thành lập các phương trình trên ta đã xét trường hợp đặc biệt là hệ toạ độ camera x,y,z trùng với hệ toạ độ cơ bản X,Y,Z. Dưới đây xét trường hợp chung khi x,y,z không trùng với X,Y,Z.

Trên hình 7.16 ký hiệu M là một điểm không gian, được xác định trong hệ toạ độ cơ bản X, Y, Z và m là hình chiếu của điểm M trên mặt phẳng chiếu, được xác định trong hệ tạo độ x,y,z gắn liền với camera.

Giả sử camera đặt ở tâm khớp quay, xác định bằng bán kính vectơ $\mathbf{r}_k$ (X_k,Y_k,Z_k) trong hệ toạ độ X,Y,Z và điểm gốc hệ toạ độ x,y,z đặt ở tâm mặt phẳng chiếu, cách tâm khớp quay một khoảng cách biểu thị bằng $\mathbf{r}_p(r_1,r_2,r_3)$. Vậy điểm gốc của hệ toạ độ x,y,z xác định trong hệ toạ độ X,Y,Z bằng véctơ $\mathbf{r}_o$:

$$\mathbf{r}_o = \mathbf{r}_k + \mathbf{r}_p \qquad (7.48)$$

Khớp quay ở điểm đặt camera đảm bảo góc quay α giữa các trục x và X, góc nghiêng θ giữa các trục z và Z.

Từ đó ma trận biến đổi hệ toạ độ giữa x,y,z và X,Y,Z, như đã trình bày ở chương III, có thể xác định như sau:

$$A_0 = \left[\begin{array}{ccc:c} & & & -(X_k + r_1) \\ & R(x,\alpha).R(z,\theta) & & -(Y_k + r_2) \\ & & & -(Z_k + r_3) \\ \hdashline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array}\right] \qquad (7.49)$$

Trong đó:

$$R(x,\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha & 0 \\ 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (7.50)$$

$$R(z,\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (7.51)$$

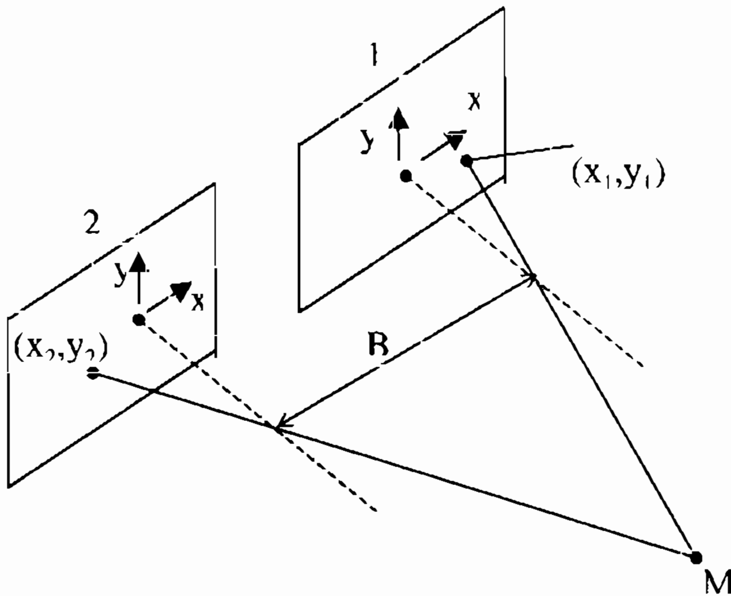
Sau phép biến đổi (7.49) có thể áp dụng trường hợp (7.31), (7.32) ta có:

$$\widetilde{\mathbf{r}}_c = A_c A_0 \widetilde{\mathbf{r}} \qquad (7.52)$$

7.3.3. Phép chiếu hình lập thể (stereo).

Như ở phần trên đây đã đề cập tới, một điểm trên mặt phẳng chiếu có thể là hình chiếu của nhiều điểm trong không gian, vì thế chưa thể xác định được vị trí thực của nó trong không gian 3 chiều. Để hình dung được chiều sâu của hình ảnh cần đến phép chiếu lập thể (stereo).

Phép chiếu lập thể cần đến 2 hình chiếu x_1,y_1 và x_2,y_2 của cùng một điểm M trong không gian (hình 7.17). Khoảng cách giữa 2 tiêu cự của 2 thấu kính gọi là khoảng chuẩn B.



Hình 7.17. *Sơ đồ phép chiếu lập thể*

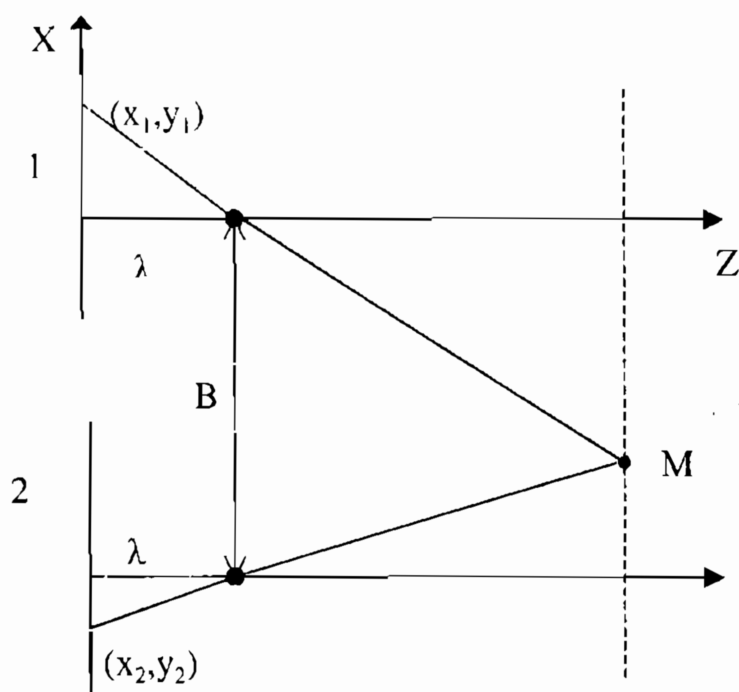
Nhiệm vụ đặt ra là phải xác định được các toạ độ X,Y,Z của điểm M thông qua các toạ độ hình chiếu x_1,y_1 và x_2,y_2 của nó. Giả sử rằng các camera như nhau và cả hai hệ toạ độ gắn liền với camera hoàn toàn trùng khớp nhau, chỉ khác vị trí gốc ban đầu. Cũng như ở phần trên, khi cho các hệ toạ độ gắn liền với các camera trùng với hệ toạ độ cơ bản thì mặt phẳng chiếu xy trùng với mặt phẳng XY. Khi làm như vậy toạ độ Z của điểm M được giữ như nhau đối với cả 2 hệ toạ độ camera.

Khi cho hệ toạ độ camera thứ nhất trùng với hệ toạ độ cơ bản X,Y,Z như hình 7.18 ta có:

$$X_1 = \frac{x_1}{\lambda}(\lambda - Z_1) \qquad (7.53)$$

Tương tự làm như vậy đối với camera thứ 2, ta có:

$$X_2 = \frac{x_2}{\lambda}(\lambda - Z_2) \qquad (7.54)$$



Hình 7.18. *hình 7.17 nhìn từ trên xuống khi cho trùng hệ toạ độ camera thứ nhất với hệ toạ độ cơ bản XYZ*

Nhờ có các điều kiện, như đã nêu ở trên:

$$X_2 = X_1 + B \tag{7.55}$$

$$Z_2 = Z_1 = Z \tag{7.56}$$

từ (7.53) ÷ (7.56) ta có:

$$X_2 = X_1 + B = \frac{x_2}{\lambda}(\lambda - Z_1) \tag{7.57}$$

$$X_1 = \frac{x_1}{\lambda}(\lambda - Z_1) \tag{7.58}$$

và từ (7.56) và (7.58) ta nhận được:

$$Z = \lambda - \frac{\lambda B}{x_2 - x_1} \tag{7.59}$$

Như vậy các tọa độ X,Y,Z của điểm M trong không gian 3 chiều hoàn toàn được xác định bằng (7.39), (7.40) và (7.59).

7.3.4. Mô tả quan hệ robot và camera.

Phương trình (7.34) cho biết tọa độ điểm của vật thể trong không gian 3 chiều X,Y,Z (vectơ $\tilde{r}$) thông qua thông tin về hình chiếu của điểm đó (vectơ $\tilde{r}_c$) trên mặt phẳng chiếu của camera. Ma trận (7.35) mô tả sự chuyển đổi từ hệ tọa độ gắn liền với camera sang hệ tọa độ cơ bản và có thể biểu thị tổng quát hơn cho cả vật thể là ma trận CAM.

Theo các ký hiệu đã trình bày ở phần ví dụ trong phần 7.2.2 thì P mô tả vị trí trạng thái (vị trí và định hướng) của chiếc chốt vật thể trong hệ tọa độ gốc (hệ tọa độ cơ bản X,Y,Z). Vậy ở đây có thể biểu thị:

$$P = CAM\ PC \tag{7.60}$$

với PC mô tả vật thể đang xem xét trong hệ tọa độ gắn liền với camera.

Trong những trường hợp vị trí trạng thái của vật thể được xác định theo mối quan hệ bố trí không gian của robot, ví dụ (7.19), thì từ (7.60) có thể xác định ma trận chuyển đổi từ hệ tọa độ gắn liền với camera sang hệ tọa độ cơ bản:

$$CAM = P\ PC^{-1} \tag{7.61}$$

6.4. THỂ HIỆN CHƯƠNG TRÌNH THAO TÁC CỦA ROBOT

Chương trình thao tác của robot thực hiện các nhiệm vụ được giao. Nhiệm vụ đó được mô tả bằng một dãy liên tiếp các vị trí thao tác. Trong ví dụ ở phần 7.2.2 là các thao tác từ p_1 đến p_8 (hình 7.8). Các thao tác này được thể hiện bằng một chương trình, trong đó từ các phương trình từ (7.5) đến (7.12), tương ứng với các thao tác từ p_1 đến p_8, cần xác định ra T_6 ứng với mỗi vị trí trạng thái của điểm cuối của cánh tay robot trong hệ toạ độ cơ bản (hệ toạ độ cố định). Ví dụ, ứng với thao tác p_1, từ (7.5) ta viết:

$$Z\,T_6\,E = P\,PA \qquad (7.62)$$

ta có: $$T_6\,E = Z^{-1}\,P\,PA \qquad (7.63)$$

và cứ thế, tiếp đến p_2 cho đến p_8.

Nhưng trước khi thể hiện chương trình các thao tác đó, cần sử dụng thêm 2 biến:

COORD - mô tả hệ tọa độ ứng với vị trí đang xét.

TOOL - mô tả dụng cụ đang được sử dụng.

Như vậy tất cả các phương trình (tương tự 7.6.3) ứng với các vị trí thao tác đều có thể viết dưới dạng sau:

$$T_6\,TOOL = COORD\ POS \qquad (7.64)$$

Ví dụ, ứng với thao tác p_1, ta có

COORD : = - Z + P ;

TOOL : = E ;

và thao tác là : MOVE PA ;

Trong cách viết trên, dùng dấu (+) để chỉ phép nhân ma trận và dấu (-) để chỉ phép nhân ma trận nghịch đảo.

Theo đó, chương trình thể hiện các thao tác của robot từ p_1 đến p_8 có thể viết như sau:

```
TOOL : = E    ;                  Gắn dụng cụ
FOR I : =     1, 2     DO
BEGIN
        READ (CAMERA, PC) ;      Thông tin từ camera
        P : = CAM + PC ;         Vị trí của chốt
```

COORD : = -Z + P ;	Toạ độ của chốt
MOVE PA ;	Hướng tới chốt
MOVE PG ;	Sắp kẹp chốt
GRASP :	Kẹp
TOOL : = E - PG :	Dụng cụ bây giờ bao gồm bàn kẹp đã kẹp chốt.
MOVE PD ;	Vị trí xuất phát (bắt đầu mang chốt đi)
HT : = HR [I] ;	Vị trí lắp vào lỗ
COORD : = - Z + H + HT ;	Toạ độ của lỗ
MOVE PHA ;	Hướng tới lỗ
MOVE PCH ;	Chạm vào lỗ
MOVE PAL ;	Đặt đồng tâm với lỗ (lúc chuẩn bị lắp)
MOVE PN ;	Lắp vào lỗ
RELEASE ;	Dời đi
COORD: = -Z+H+HT+PN	Toạ độ của lỗ đã lắp
TOOL : + E	
MOVE PA	

END

7.5. CHUYỂN ĐỘNG GIỮA CÁC ĐIỂM TỰA.

7.5.1. Đặt vấn đề

Như đã trình bày ở chương V khi lập trình quỹ đạo chuyển động robot để thực hiện nhiệm vụ đặt ra, thông thường cần biết vị trí và định hướng của khâu tác động cuối của robot ở những điểm khác nhau trong không gian thao tác.Gọi chúng là *các điểm tựa* . Các điểm tựa này bao gồm các vị trí bắt buộc phải đi qua để thực hiện nhiệm vụ và cả những vị trí cũng phải đi qua để tránh chướng ngại vật trên đường đi. Tuỳ theo công việc và môi trường làm việc của robot mà quyết định số lượng các điểm tựa. Khi biết vị trí và định hướng của khâu tác động cuối theo các phương pháp giải bài toán động học ngược, xác định được các giá trị biến khớp (toạ độ suy rộng) để điều khiển chuyển động của từng khớp động và

tổng hợp lại thành chuyển động chung của robot theo một quỹ đạo nhất định. Hay nói chính xác hơn là theo các điểm tựa của quỹ đạo. Ở phần này, khảo sát sự chuyển động giữa các điểm tựa đó là để chọn ra những qui luật chuyển động hợp lý. Các ràng buộc ở đây có thể là gia tốc và vận tốc chuyển dịch, còn các hạn chế do chướng ngại vật trên đường đi đã được định trước bằng vị trí các điểm tựa bổ sung. Ở phần cuối sẽ xem xét đến các hạn chế về động lực học khi chọn lựa quy luật chuyển động của robot.

Có 2 cách tiếp cận vấn đề về chọn lựa quy luật chuyển động hợp lý giữa các điểm tựa.

Cách thứ nhất thường tiến hành trong hệ toạ độ suy rộng, tức là trong không gian các biến khớp q_i (t). Khi đó, nếu cho trước các điều kiện như đảm bảo độ liên tục và điều hoà ở những điểm chuyển tiếp, có thể xác định các hệ số của hàm đa thức biểu thị gần đúng đường cong quỹ đạo.

Cách thứ hai thường dùng trong hệ toạ độ Đề các. Lúc đó cho trước dạng hàm giải tích, ví dụ, hàm bậc nhất biểu thị quỹ đạo gồm nhiều đoạn thẳng nối tiếp nhau. Sau đó, thay thế gần đúng quỹ đạo này bằng quan hệ hàm tương ứng của các biến khớp.

Như vậy lập trình quỹ đạo qua các điểm tựa có thể tiến hành trong hệ toạ độ các biến khớp hoặc trong hệ toạ độ Đề các. Khi lập trình trong hệ toạ độ các biến khớp, cần biết quan hệ $q_i(t)$ và các đạo hàm bậc nhất và bậc hai của chúng.

Lập trình quỹ đạo trong hệ toạ độ các biến khớp có các ưu điểm sau:

1) Cho biết thông tin về biến khớp là những thông số điều khiển trực tiếp các khớp động;

2) Vì vậy có nhiều khả năng đảm bảo thời gian thực trong điều khiển;

3) Việc lập trình dễ dàng hơn.

Nhược điểm chính là thông qua giá trị của các biến khớp chưa thể hình dung ra ngay vị trí của cơ cấu tay máy trong không gian, mà vì vậy phải tính toán nhiều lần, ví dụ, để kiểm nghiệm xem có bị chạm vào các vật thể xung quanh không.

Thường dùng hơn là cách thức sau: từ toạ độ các điểm tựa giải bài toán động học ngược để tìm giá trị các biến khớp, rồi dùng phép nội suy xấp xỉ bằng hàm đa thức bậc thấp để xây dựng quy luật thay đổi thích hợp các giá trị biến khớp, tương ứng với quỹ đạo qua các điểm tựa bắt buộc.

Có nhiều phương pháp giải quyết vấn đề này, ví dụ, mô tả quỹ đạo gồm nhiều đoạn thẳng nối tiếp hoặc dùng Spline bậc 3 v.v...

7.5.2. Mô tả quỹ đạo bằng Spline bậc 3.

Spline bậc 3 là phép nội suy hàm đa thức bậc 3 để đảm bảo sự liên tục của đạo hàm bậc nhất và bậc 2 tại các điểm tựa. Phương pháp này cho phép xây dựng quy luật xấp xỉ với độ biến đổi đều hoà và độ chính xác cần thiết.

Xét dưới đây trường hợp quỹ đạo bắt đầu từ điểm xuất phát và đi qua 5 điểm tựa. Khi dùng Spline bậc 3, mỗi đoạn quỹ đạo được mô tả bằng một đa thức bậc 3:

$$h_j(t) = a_{j3}\, t^3 + a_{j2}\, t^2 + a_{j1}\, t + a_{j0} \tag{7.65}$$

với t - thời gian quy đổi:

$$t = \frac{\tau - \tau_{j-1}}{\tau_j - \tau_{j-1}}; \quad \tau \in [\tau_{j-1}, \tau_j], \quad t \in [0,1]$$

τ - thời gian thực, tính bằng giây;

τ_j - thời gian (thực) ứng với điểm cuối của đoạn quỹ đạo thứ j;

τ_{j-1} - thời gian (thực) ứng với điểm đầu của đoạn quỹ đạo thứ j.

a_{ij} - hệ số thứ i của đa thức ứng với đoạn quỹ đạo thứ j, j = 1,2,3,4, n (n là đoạn cuối).

Trên hình 7.19 trình bày các đoạn quỹ đạo mô tả bằng Spline bậc 3. Điều kiện biên của các đoạn quỹ đạo cũng ghi trên hình vẽ, bao gồm giá trị q_j ở các điểm tựa, vận tốc v_j và gia tốc a_j.

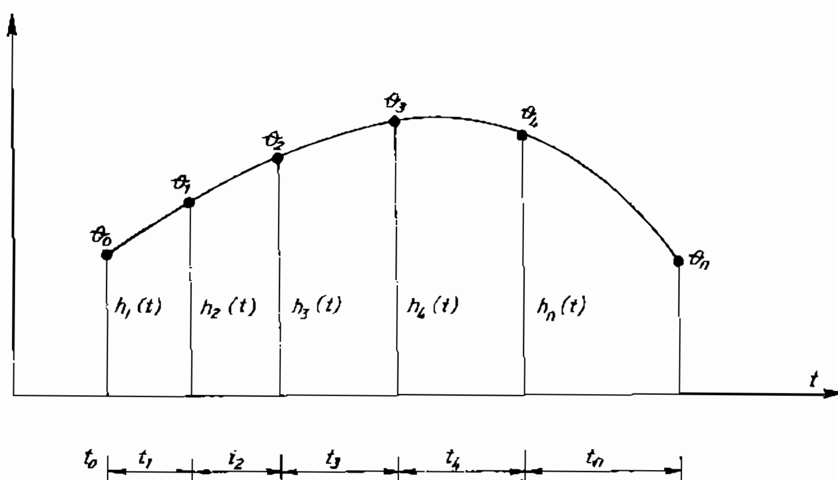
Đạo hàm bậc nhất và bậc 2 của hàm đa thức $h_j(t)$ theo thời gian thực được tính như sau:

$$v_j(t) = \frac{dh_j(t)}{d\tau} = \frac{dh_j(t)}{dt} \cdot \frac{dt}{d\tau} = \frac{1}{\tau - \tau_{j-1}} \cdot \frac{dh_j(t)}{dt} =$$

$$= \frac{1}{t_j}\, \frac{dh_j(t)}{dt} = \frac{1}{t_j}\dot{h}_j(t), \quad j = 1,2...n \tag{7.66}$$

$$a_j(t) = \frac{d^2h_j(t)}{d\tau^2} = \frac{1}{(\tau_j - \tau_{j-1})^2} \cdot \frac{d^2h_j(t)}{dt^2} =$$

$$= \frac{1}{t^2_j} \frac{d^2h_j(t)}{dt^2} = \frac{1}{t^2_j} \ddot{h}_j(t), \quad j = 1,2...n \tag{7.67}$$



Hình 7.19. *Mô tả quỹ đạo bằng Spline bậc 3.*

Các hệ số a_{ji} được xác định từ các điều kiện biên này.

Đoạn quỹ đạo thứ nhất mô tả bằng đa thức sau:

$$h_1(t) = a_{13}t^3 + a_{12}t^2 + a_{11}t + a_{10} \tag{7.68}$$

Ở vị trí xuất phát t =0 và q_0 biết trước, ta có:

$$h_1(o) = a_{10} = q_o \tag{7.69}$$

$$v_o = \frac{\dot{h}_1(o)}{t_1} = \frac{a_{11}}{t_1}$$

Từ đó, ta có :

$$\left.\begin{aligned} a_{11} &= v_o t_1 \\ a_{12} &= \frac{a_o t_1^2}{2} \end{aligned}\right\} \tag{7.70}$$

và do đó ta có:

$$a_o = \frac{\ddot{h}_1(o)}{t_1^2} = \frac{2a_{12}}{t_1^2} \qquad (7.71)$$

Ở vị trí t =1, ta có:

$$h_1(t) = a_{13} + \frac{a_o t_1^2}{2} + v_o t_1 + q_o = q_1 \qquad (7.72)$$

Từ đó, ta có:

$$a_{13} = \delta_1 - v_o t_1 - \frac{a_o t_1^2}{2} \qquad (7.73)$$

Ở đây cũng như về sau dùng ký hiệu $\delta_i = q_i - q_{i-1}$

Như vậy, đoạn quỹ đạo đầu tiên được biểu thị bằng phương trình sau:

$$h_1(t) = (\delta_1 - v_o t_1 - \frac{a_o t_1^2}{2})t^3 + (\frac{a_o t_1^2}{2})t^2 + (v_o t_1)t + q_o \qquad (7.74)$$

Từ đó, xác định vận tốc và gia tốc tại điểm cuối của đoạn quỹ đạo thứ nhất:

$$\frac{\dot{h}_1(1)}{t_1} = v_1 = \frac{3\delta_1 - (a_o t_1^2)/2 - 2v_o t_1}{t_1} = \frac{3\delta_1}{t_1} - 2v_o - \frac{a_o t_1}{2} \qquad (7.75)$$

$$\frac{\ddot{h}_1(1)}{t_1} = a_1 = \frac{6\delta_1 - 2a_o t_1^2 - 6v_o t_1}{t_1^2} = \frac{6\delta_1}{t_1^2} - \frac{6v_o}{t_1} - 2a_o \qquad (7.76)$$

Đây cũng là vận tốc và gia tốc tại điểm đầu của đoạn quỹ đạo thứ hai.

Đoạn quỹ đạo cuối được mô tả bằng đa thức sau:

$$h_n(t) = a_{n3}t^3 + a_{n2}t^2 + a_{n1}t + a_{no} \qquad (7.77)$$

Theo các điều kiện ở điểm đầu (t = 0) và điểm cuối (t =1) của đoạn quỹ đạo, xác định:

$$h_n(o) = a_{no} = q_n \text{ cho biết trước} \quad (7.78)$$

$$h_n(1) = a_{n3} + a_{n2} + a_{n1} + q_n = q_f \quad (7.79)$$

$$\frac{\dot{h}_n(1)}{t_n} = v_f = \frac{3a_{n3} + 2a_{n2} + a_{n1}}{t_n} \quad (7.80)$$

$$\frac{\ddot{h}_n(1)}{t_n^2} = a_f = \frac{6a_{n3} + 2a_{n2}}{t_n^2} \quad (7.81)$$

Giải các phương trình này để tìm các hệ số a_{n3}, a_{n2}, a_{n1}, cuối cùng ta có:

$$h_n(t) = (\delta_n - v_f t_n + \frac{a_f t_n^2}{2})t^3 + (-3\delta_n + 3v_f t_n - a_f t_n^2)t^2 +$$
$$+ (3\delta_n - 2v_f t_n + \frac{a_f t_n^2}{2})t + q_n \quad (7.82)$$

với $\delta_n = q_1 - q_n$

Đoạn quỹ đạo thứ hai được mô tả bằng đa thức sau:

$$h_2(t) = a_{23}t^3 + a_{22}t^2 + a_{21}t + a_{20} \quad (7.83)$$

Theo các điều kiện biên ở điểm đầu của quỹ đạo này (t=o) ta có:

$$h_2(0) = a_{20} = q_1 \quad (7.84)$$

$$v_1 = \frac{\dot{h}_2(o)}{t_2} = \frac{a_{21}}{t_2} = \frac{\dot{h}_1(1)}{t_1} \quad (7.85)$$

do vậy: $a_{21} = v_1 t_2$,

$$a_1 = \frac{\ddot{h}_2(0)}{t_2^2} = \frac{2a_{22}}{t_2^2} = \frac{\ddot{h}_1(1)}{t_1^2} \quad (7.86)$$

từ đó:

$$a_{22} = \frac{a_1 t_2^2}{2}$$

Với các hệ số này đa thức $h_2(t)$ có dạng sau:

$$h_2(t) = a_{23} t^3 + (\frac{a_1 t_2^2}{2}) t^2 + (v_1 t_2) t + q_1, \qquad (7.87)$$

với:

$$v_1 = \frac{3\delta_1}{t_1} - 2v_o - \frac{a_o t_1}{2}. \qquad (7.88)$$

$$a_1 = \frac{6\delta_1}{t_1^2} - \frac{6v_o}{t_1} - 2a_o. \qquad (7.89)$$

Thay vào (7.87) các điều kiện t = 1 ứng với điểm cuối của quỹ đạo thứ hai, cũng tức là điểm đầu của đoạn quỹ đạo tiếp theo:

$$h_2(1) = q_2 = a_{23} + \frac{a_1 t_2^2}{2} + v_1 t_2 + q_1, \qquad (7.90)$$

$$\frac{\dot{h}_2(1)}{t_2} = v_2 = \frac{3a_{23} + a_1 t_2^2 + v_1 t_2}{t_2} = v_1 + a_1 t_2 + \frac{3a_{23}}{t_2} \qquad (7.91)$$

$$\frac{\ddot{h}_2(1)}{t_2^2} = a_2 = \frac{6a_{23} + a_1 t_2^2}{t_2^2} = a_1 + \frac{6a_{23}}{t_2^2} \qquad (7.92)$$

Các giá trị q_2, v_2 và a_2 đều phụ thuộc vào a_{23}.

Đoạn quỹ đạo thứ ba được mô tả bằng đa thức sau:

$$h_3(t) = a_{33} t^3 + a_{32} t^2 + a_{31} t + a_{30} \qquad (7.93)$$

Ở điểm đầu t =0, ta có:

$$h_3(o) = a_{30} = q_2 = a_{23} + \frac{a_1 t_2^2}{2} + v_1 t_2 + q_1 \qquad (7.94)$$

$$v_2 = \frac{\dot{h}_3(o)}{t_3} = \frac{a_{31}}{t_3} = \frac{\dot{h}_2(1)}{t_2} \qquad (7.95)$$

Từ đó, $a_{31} = v_2 t_3$.

Tiếp theo,

$$a_2 = \frac{\ddot{h}_3(o)}{t_3^2} = \frac{2a_{32}}{t_3^2} = \frac{\ddot{h}_2(1)}{t_2^2} \qquad (7.96)$$

Từ đó ta có:

$$a_{32} = \frac{a_2 t_3^2}{2}$$

Thay các hệ số vừa xác định được vào (7.93) ta có:

$$h_3(t) = a_{33}t^3 + (\frac{a_2 t_3^2}{2})t^2 + (v_2 t_3)t + q_2 \qquad (7.97)$$

Theo điều kiện biên khi t = 1, ứng với điểm cuối của đoạn quỹ đạo thứ ba, cũng tức là điểm đầu của đoạn quỹ đạo tiếp theo, ta có:

$$h_3(1) = q_3 = q_2 = v_2 t_3 + \frac{a_2 t_3^2}{2} + a_{33}, \qquad (7.98)$$

$$\frac{\dot{h}_3(1)}{t_3} = v_3 = \frac{3a_{33} + a_2 t_3^2 + v_2 t_3}{t_3} = v_2 + a_2 t_3 + \frac{3a_{33}}{t_3} \qquad (7.99)$$

$$\frac{\ddot{h}_3(1)}{t_3^2} = a_3 = \frac{6a_{33} + a_3 t_3^2}{t_3^2} = a_2 + \frac{6a_{33}}{t_3^2} \qquad (7.100)$$

Các giá trị q_3, v_3 và a_3 đều phụ thuộc vào a_{33}.

Đoạn quỹ đạo thứ tư được mô tả bằng đa thức sau:

$$h_4(t) = a_{43}t^3 + a_{42}t^2 + a_{41}t + a_{40} \qquad (7.101)$$

$$v_3 = \frac{\dot{h}_4(o)}{t_4} = \frac{a_{41}}{t_4} = \frac{\dot{h}_3(1)}{t_3} \quad (7.102)$$

$$h_4(o) = a_{40} = q_3 = q_2 + v_2 t_3 + \frac{a_2 t_3^2}{2} + a_{33} \quad (7.103)$$

Ứng với các điều kiện biên tại điểm đầu , t = 0, ta có:

$$a_{41} = v_3 t_4.$$

Tiếp theo:

$$a_3 = \frac{\ddot{h}_4(0)}{t_4^2} = \frac{2a_{42}}{t_4^2} = \frac{\ddot{h}_3(1)}{t_2^2} \quad (7.104)$$

Từ đó ta có :

$$a_{42} = \frac{a_3 t_4^2}{2}$$

Thay các hệ số vừa tìm được vào (7.101), ta có:

$$h_4(1) = a_{43} t^3 + (\frac{a_3 t_4^2}{2}) t^2 + (v_3 t_4) t + q_3 \quad (7.105)$$

Theo điều kiện biên tại điểm cuối t =1, ta có:

$$h_4(t) = a_{43} + \frac{a_3 t_4^2}{2} + v_3 t_4 + q_3 = q_4 \quad (7.106)$$

$$\frac{\dot{h}_4(1)}{t_4} = \frac{3a_{43}}{t_4} + a_3 t_4 + v_3 = v_4 = \frac{3\delta_n}{t_n} - 2v_f + \frac{a_f t_n}{2} \quad (7.107)$$

$$\frac{\ddot{h}_4(1)}{t_4^2} = \frac{ba_{43}}{t_4^2} + a_3 = a_4 = \frac{-6\delta_n}{t_n^2} + \frac{6v_f}{t_n} - 2a_f \quad (7.108)$$

Từ phương trình này có thể xác định các hệ số a_{23}, a_{33}, a_{43} ở phần trên còn là ẩn số.

Cuối cùng có phương trình các đoạn quỹ đạo như sau:

$$h_1(t) = (\delta_1 - v_0 t_1 - \frac{a_0 t_1^2}{2})t^3 + (\frac{a_0 t_1^2}{2})t^2 + (v_0 t_1)t + q_0 \quad (6.109)$$

$$v_1 = \frac{3\delta_1}{t_1} - 2v_0 - \frac{a_0 t_1}{2}; a_1 = \frac{6\delta_1}{t_1^2} - \frac{6v_0}{t_1} - 2a_0 \quad (7.110)$$

$$h_2(t) = a_{23} t^3 + (\frac{a_1 t_2^2}{2})t^2 + (v_1 t_2)t + q_1 \quad (7.111)$$

$$q_2 = a_{23} + \frac{a_1 t_2^2}{2} + v_1 t_2 + q_1 \quad (7.112)$$

$$v_2 = v_1 + a_1 t_2 + \frac{3a_{23}}{t_2}; \quad a_2 = a_1 + \frac{6a_{23}}{t_2^2} \quad (7.113)$$

$$h_3(t) = a_{33} t^3 + (\frac{a_2 t_3^2}{2})t^2 + v_2 t_3 t + q_2 \quad (7.114)$$

$$q_3 = q_2 + v_2 t_3 + \frac{a_2 t_3^2}{2} + a_{33} \quad (7.115)$$

$$v_3 = v_2 + a_2 t_3 + \frac{3a_{33}}{t_3}; \quad a_3 = a_2 + \frac{6a_{33}}{t_3^2} \quad (7.116)$$

$$h_4(t) = a_{43} t^3 + (\frac{a_3 t_4^2}{2})t + (v_3 t_4)t + q_3 \quad (7.117)$$

$$h_n(t) = (\delta_n - v_f t_n + \frac{a_f t_n^2}{2})t^3 + (-3\delta_n + 3v_f t_n - a_f t_n^2)t^2 + + (3\delta_n - 2v_f t_n + \frac{a_f t_n^2}{2})t + q_4 \quad (7.118)$$

$$v_4 = \frac{3\delta_n}{t_n} - 2v_f + \frac{a_f t_n}{2}; a_4 = \frac{6\delta_n}{t_n^2} - \frac{6v_f}{t_n} - 2a_f \quad (7.119)$$

$$a_{23} = t_2^2 \frac{x_1}{D}, \quad a_{33} = t_3^2 \frac{x_2}{D}, \quad a_{43} = t_4^2 \frac{x_3}{D} \qquad (7.120)$$

Trong đó:

$$x_1 = k_1(u-t_2)+k_2(t_4^2-d)-k_3[(u-t_4)d+t_4^2(t_4-t_2) \qquad (7.121)$$

$$x_2 = -k_1(u+t_3)+k_2(c-t_4^2)+k_3[(u-t_4)c+t_4^2(u-t_2)] \qquad (7.122)$$

$$x_3 = k_1(u-t_4)+k_2(d-c)+k_3[(t_4-t_2)c-d(u-t_2)] \qquad (7.123)$$

$$D = u(u-t_2)(u-t_4) \qquad (7.124)$$

$$u = t_2 + t_3 + t_4 \qquad (7.125)$$

$$k_1 = q_4 - q_1 - v_1 u - a_1 \frac{u^2}{2} \qquad (7.126)$$

$$k_2 = \frac{v_4 - v_1 - a_1 u - (a_4 - a_1)u/2}{3} \qquad (7.127)$$

$$k_3 = \frac{a_4 - a_1}{6} \qquad (7.128)$$

$$c = 3u_2 - 3ut_2 + t_2^2 \qquad (7.129)$$

$$d = 3t_4^2 + 3t_3t_4 + t_3^2 \qquad (7.130)$$

6.5.3. Lập trình quỹ đạo trong hệ toạ độ Đề các

Trong phần trước đã xây dựng qũy đạo trong không gian các biến khớp (toạ độ suy rộng) và nội suy bằng đa thức bậc thấp. Mặc dù theo giá trị các biến khớp có thể hoàn toàn xác định vị trí và định hướng của bàn kẹp trong không gian toạ độ Đề các. Tuy nhiên, để dễ hình dung trực quan hơn, người lập trình cần trực tiếp tiến hành lập trình quỹ đạo trong hệ toạ độ Đề các. Nhiệm vụ lập trình là xây dựng qũy đạo chuyển động của bàn kẹp, (mặc dầu nói là bàn kẹp nhưng ở đây được hiểu chính xác hơn là của điểm tác động cuối, khi dụng cụ đã gắn vào tay máy hoặc bàn kẹp) đảm bảo vị trí trạng thái (vị trí và định hướng) của nó tại các điểm tựa và nối liền các điểm tựa này với nhau.

Như đã biết tại từng điểm tựa có thể dùng ma trận thuần nhất 4x4 để mô tả quan hệ giữa hệ toạ độ gắn liền với bàn kẹp và hệ toạ độ cơ bản.

Giá trị các biến khớp tại các điểm tựa này được xác định theo các phương pháp giải bài toán động học ngược. Như vậy ma trận 4x4 nói trên cũng hoàn toàn xác định, chỉ còn việc di chuyển từ điểm tựa này sang điển tựa kia là chưa xác định. Theo phương pháp trong [7] từ điểm tựa này sang điểm tựa kia có thể thực hiện bằng cách di chuyển theo đường thẳng nối hai điểm và theo các chuyển động quay để đảm bảo định hướng tới của bàn kẹp.

Trong trường hợp này chúng ta viết:

$$T_6 = C_j(t)P_{ij} \qquad (7.131)$$

với T_6 - ma trận thuần nhất 4x4, mô tả định vị và định hướng của bàn kẹp trong hệ toạ độ cơ bản.

P_{ij} - ma trận thuần nhất 4x4, mô tả định vị và định hướng của vật thể đối tác khi bị kẹp giữa bàn kẹp đang ở vị trí thứ i trong hệ toạ độ tham chiếu thứ j của vật thể đối tác.

$C_j(t)$ - ma trận thuần nhất 4x4, mô tả quan hệ giữa hệ toạ độ tham chiếu của vật thể đối tác so với hệ toạ độ cơ bản.

Quan hệ này có thể thay đổi theo thời gian t, hoặc không đổi, thậm chí bằng ma trận đơn vị, nếu hệ toạ độ tham chiếu này trùng với hệ toạ độ cơ bản.

Nếu chọn gốc hệ toạ độ tham chiếu của vật thể đối tác trùng với điểm thứ (i+1) khi xét chuyển động của điểm thứ i thì ta có:

$$T_6 = C_{i,i+1}(t)\, P_{i,i+1} \qquad (7.132)$$

Theo [7] việc di chuyển từ điểm thứ i tới điểm thứ (i+1) có thể mô tả bằng ma trận D(λ), bổ sung vào (7.132), ta có:

$$T_6(\lambda) = C_{i+1}(\lambda)\, P_{i,i+1}\, D(\lambda) \qquad (7.133)$$

với

$$\lambda = \frac{t}{T}, \lambda \in [0,1]$$

t - thời gian thực tính từ điểm đầu của đoạn quỹ đạo đang xét;

T - tổng thời gian di chuyển trên đoạn qũy đạo này.

Vậy λ là thời gian quy đổi không thứ nguyên.

Ở điểm đầu của đoạn quỹ đạo. điểm i: t = o; λ = o; D(o) bằng ma trận đơn vị và ở điểm cuối đoạn quỹ đạo điêm i +1, thì t = T; λ = 1 và

$$P_{i+1,i+1} = P_{i,i+1}D(1) \qquad (7.134)$$

Từ đó ta có:

$$D(1) = (P_{i,i+1})^{-1} (P_{i+1,i+1}). \qquad (7.135)$$

Như đã biết, có thể mô tả định vị và định hướng của bàn kẹp (khi đã kẹp vật thể đối tác) tại các vị trí điểm tựa i và (i+1) bằng các ma trận A và B sau đây:

$$P_{i,i+1} = A = \begin{bmatrix} n_x^A & s_x^A & a_x^A & p_x^A \\ n_y^A & s_y^A & a_y^A & p_y^A \\ n_z^A & s_z^A & a_z^A & p_z^A \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{n}_A & \mathbf{s}_A & \mathbf{a}_A & \mathbf{p}_A \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (7.136)$$

$$P_{i+1,i+1} = B = \begin{bmatrix} n_x^B & s_x^B & a_x^B & p_x^B \\ n_y^B & s_y^B & a_y^B & p_y^B \\ n_z^B & s_z^B & a_z^B & p_z^B \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{n}_B & \mathbf{s}_B & \mathbf{a}_B & \mathbf{p}_B \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (7.137)$$

Trên cơ sở (7.135), (7.136) và (7.137) ta có:

$$D(1) = \begin{bmatrix} \mathbf{n}_A.\mathbf{n}_B & \mathbf{n}_A.\mathbf{s}_B & \mathbf{n}_A.\mathbf{a}_B & \mathbf{n}_A.(\mathbf{p}_B - \mathbf{p}_A) \\ \mathbf{s}_A.\mathbf{n}_B & \mathbf{s}_A.\mathbf{s}_B & \mathbf{s}_A.\mathbf{a}_B & \mathbf{s}_A.(\mathbf{p}_B - \mathbf{p}_A) \\ \mathbf{a}_A.\mathbf{n}_B & \mathbf{a}_A.\mathbf{s}_B & \mathbf{a}_A.\mathbf{a}_B & \mathbf{a}_A.(\mathbf{p}_B - \mathbf{p}_A) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (7.138)$$

Dấu chấm (.) giữa hai thừa số (ví dụ, $\mathbf{n}_A.\mathbf{n}_B$) là ký hiệu phép nhân vô hướng vectơ.

Ma trận $D(\lambda)$ có thể biểu thị bằng một quan hệ hàm sau [7]:

$$D(\lambda) = L(\lambda)\, R_A(\lambda)\, R_B(\lambda), \qquad (7.139)$$

với

$$L(\lambda) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \lambda x \\ 0 & 1 & 0 & \lambda y \\ 0 & 0 & 1 & \lambda z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (7.140)$$

$$R_A(\lambda)=\begin{bmatrix} S_\psi^2 V(\lambda\theta)+C(\lambda\theta) & -S_\psi C_\psi V(\lambda\theta) & C_\psi S(\lambda\theta) & 0 \\ -S_\psi C_\psi V(\lambda\theta) & C_\psi^2 V(\lambda\theta)+C(\lambda\theta) & S_\psi S(\lambda\theta) & 0 \\ -C_\psi S(\lambda\theta) & -S_\psi S(\lambda\theta) & C(\lambda\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7.141)$$

$$R_B(\lambda)=\begin{bmatrix} C(\lambda\varphi) & -S(\lambda\varphi) & 0 & 0 \\ S(\lambda\varphi) & C(\lambda\varphi) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7.142)$$

trong đó

$$V(\lambda\theta) = 1 - \cos(\lambda\theta)$$

$$C(\lambda\theta) = \cos(\lambda\theta),\ S(\lambda\theta) = \sin(\lambda\theta)$$

$$C(\lambda\varphi) = \cos(\lambda\varphi),\ S(\lambda\varphi) = \sin(\lambda\varphi)$$

và $\lambda \in [0,1]$.

Ma trận R_A mô tả sự quay ở vị trí tại điểm i, góc quay θ quanh vectơ hướng tới $\mathbf{a}_A$. Ma trận $R_B(\lambda)$ mô tả sự quay ở vị trí tại điểm (i+1), góc quay φ quanh vectơ hướng tới $\mathbf{a}_B$.

Thay (7.140), (7.141) và (7.142) vào (7.139), ta có:

$$D(\lambda)=\begin{bmatrix} \delta\mathbf{n} & \delta\mathbf{s} & \delta\mathbf{a} & \delta\mathbf{p} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7.143)$$

với

$$\delta s = \begin{bmatrix} -S(\lambda\varphi)[S_\psi^2 V(\lambda\theta)+C(\lambda\theta)]+C(\lambda\varphi)[-S_\psi C_\psi V(\lambda\theta)] \\ -S(\lambda\varphi)[-S_\psi C_\psi V(\lambda\theta)]+C(\lambda\theta)[C_\psi^2 V(\lambda\theta)+C(\lambda\theta)] \\ -S(\lambda\varphi)[-C_\psi S(\lambda\theta)]+C(\lambda\theta)[-S_\psi S(\lambda\theta)] \end{bmatrix}$$

$$\delta\mathbf{a}=\begin{bmatrix} \mathbf{C}_\psi \mathbf{S}(\lambda\theta) \\ \mathbf{S}_\psi \mathbf{S}(\lambda\theta) \\ \mathbf{C}(\lambda\theta) \end{bmatrix};\quad \delta\mathbf{p}^* = \begin{bmatrix} \lambda\mathbf{x} \\ \lambda\mathbf{y} \\ \lambda\mathbf{z} \end{bmatrix};\quad \delta\mathbf{n} = \delta\mathbf{s}\times\delta\mathbf{a}.$$

So sánh các phần tử tương ứng của 2 ma trận (7.138) và (7.143) khi $\lambda = 1$, ta có:

$$\left.\begin{aligned} x &= \mathbf{n}_A \cdot (\mathbf{p}_B - \mathbf{p}_A) \\ y &= \mathbf{s}_A \cdot (\mathbf{p}_B - \mathbf{p}_A) \\ z &= \mathbf{a}_A \cdot (\mathbf{p}_B - \mathbf{p}_A) \end{aligned}\right\} \qquad (7.144)$$

Ứng với các phần thứ 3 ta có:

$$\psi = \mathbf{arctg}\frac{\mathbf{s}_A.\mathbf{a}_B}{\mathbf{n}_A.\mathbf{a}_B} \qquad -\pi \le \psi \le \pi \qquad (7.145)$$

$$\theta = \mathbf{arctg}\frac{[(\mathbf{n}_A.\mathbf{n}_B) + (\mathbf{s}_A.\mathbf{a}_B)^2]^{1/2}}{\mathbf{a}_A.\mathbf{a}_B} \quad (0 \le \theta \le \pi) \quad (7.146)$$

Cuối cùng, tìm biểu thức tính φ:

$$S\varphi = -S\psi C\psi V(\lambda\theta)(\mathbf{n}_A.\mathbf{n}_B) + [C^2\psi V(\lambda\theta) + C(\lambda\theta)](\mathbf{s}_A.\mathbf{n}_B) - $$
$$- S\psi S(\lambda\theta)(\mathbf{n}_A.\mathbf{n}_B) \qquad (7.147)$$

$$C\varphi = -S\psi C\psi V(\lambda\theta)(\mathbf{n}_A.\mathbf{s}_B) + [C^2\psi V(\lambda\theta) + C(\lambda\theta)](\mathbf{s}_A.\mathbf{s}_B) - $$
$$- S\psi S(\lambda\theta)(\mathbf{n}_A.\mathbf{n}_B) \qquad (6.148)$$

$$\varphi = \mathbf{arctg}\frac{S_\varphi}{C_\varphi} \qquad -\pi \le \varphi \le \pi \qquad (7.149)$$

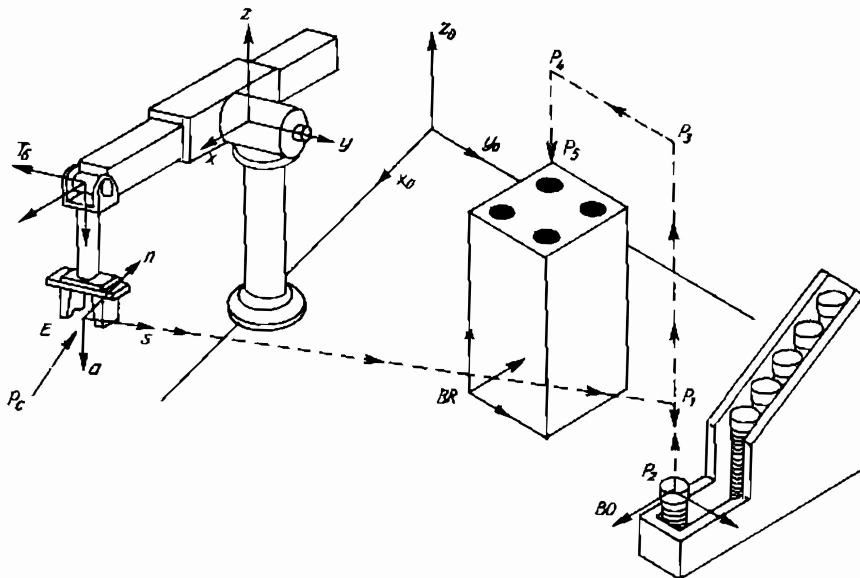
D(λ) được gọi là hàm dẫn. Tùy theo các yêu cầu định hướng bàn kẹp mà xác định D(λ), còn vị trí tâm bàn kẹp được di chuyển trên đường thẳng nối 2 điểm tựa. Nhiều khi lại còn phải dùng đoạn cong chuyển tiếp giữa 2 đoạn quỹ đạo đường thẳng để tránh sự thay đổi đột ngột về tốc độ di chuyển.

Trên đây đã trình bày trường hợp xây dựng quỹ đạo giữa 2 điểm tựa i và (i+1), theo đề xuất trong [7], như một ví dụ. Theo đó, vị trí tâm bàn kẹp được di chuyển dọc theo đường nối 2 điểm tựa. Trong khi đó bản thân bàn kẹp thực hiện các chuyển động quay (tại vị trí quay phức hợp với góc θ và Ψ, còn tại vị trí (i+1) góc quay φ). Đoạn cong chuyển tiếp tại điểm giao nhau của 2 đoạn quỹ đạo thẳng, được xây dựng như phép nội suy bậc 2.

Trong thực tế còn có thể thực hiện quỹ đạo qua các điểm tựa bằng nhiều phương pháp khác nhau và phải xét tới các đặc điểm công nghệ. Tuỳ theo loại hình công nghệ được robot phục vụ mà xác định các đặc

tính động học, động lực học tại một số điểm tựa quan trọng để đưa thêm các điều kiện ràng buộc khi xây dựng quỹ đạo đi qua các điểm tựa này. Trong phần 7.5.4 tiếp theo sẽ giới thiệu thêm một phương pháp xây dựng quỹ đạo qua các điểm tựa và có xét tới các ràng buộc về động lực học. Còn dưới đây là một ví dụ về phương pháp lập trình quỹ đạo qua các điểm tựa.

Trên hình 7.20 là sơ đồ thao tác của một robot có nhiệm vụ lấy các chiếc đinh ốc trong ổ chứa để lắp vào các lỗ và đi qua các điểm tựa theo quỹ đạo là các đoạn thẳng.



Hình 7.20. *Sơ đồ thao tác của robot qua các điểm tựa*

Theo nhiệm vụ đặt ra đó ta thiết lập các phương trình ma trận tại các vị trí điểm tựa khác nhau:

Ở điểm P_0 : [BASE] [T_6] [E] = [P_0] (7.150)

Ở điểm P_1 : [BASE] [T_6] [E] = [B0] [P_1] (7.151)

Ở điểm P_2 : [BASE] [T_6] [E] = [B0][P_2] (7.152)

Ở điểm P_3 : [BASE] [T_6] [E] = [B0] [P_3] (7.153)

Ở điểm P_4 : [BASE] [T_6] [E] = [BR] [P_4] (7.154)

Ở điểm P_5 : [BASE] [T_6] [E] = [BR] [P_5] (7.155)

Trong các phương trình trên đã dùng các kí hiệu sau biểu thị các ma trận thuần nhất 4x4:

[BASE] - ma trận quan hệ giữa hệ toạ độ cơ bản x,y,z gắn liền với robot và hệ toạ độ cố định x_0,y_0,z_0.

[B0] - ma trận quan hệ giữa hệ toạ độ gắn liền với vị trí của ổ chứa đinh ốc, so với hệ x_0,y_0,z_0.

[BR] - ma trận quan hệ giữa hệ toạ độ gắn liền với vật thể có các lỗ lắp đinh ốc, so với hệ x_0,y_0,z_0.

$[P_0]$ - ma trận quan hệ giữa hệ toạ độ gắn liền với vị trí xuất phát, so với hệ x_0, y_0, z_0.

$[P_1],[P_2],[P_3]$ - các ma trận quan hệ giữa các hệ toạ độ gắn liền với các điểm tựa P_1, P_2, P_3, so với hệ toạ độ liên quan với [BO].

$[P_4][P_5]$ - các ma trận quan hệ giữa hệ toạ độ gắn liền với các điểm tựa P_4 và P_5, so với hệ toạ độ liên quan với [BR].

$[T_6]$ - ma trận quan hệ giữa hệ toạ độ gắn liền với điểm cuối của tay máy,và hệ toạ độ cơ bản x,y,z,

[E] - ma trận quan hệ giữa hệ toạ độ gắn liền với bàn kẹp so với hệ toạ độ $[T_6]$.

Để biểu thị sự dịch chuyển từ điểm P_i đến P_{i+1} (i = 0,1,2,3,4) dùng ma trận $P_{i,i+1}$. Ví dụ ,khi mô tả sự chuyển dịch từ P_0 đến P_1 ta viết lại (7.150) trong hệ toạ độ P_0:

$$[T_6] = [BASE]^{-1}[P_{00}][E]^{-1} \qquad (7.156)$$

và trong hệ toạ độ P_1, ta có

$$[T_6] = [BASE]^{-1}[BO][P_{01}][E]^{-1} \qquad (7.157)$$

Từ (6.156) và (6.157), ta có

$$[P_{01}] = [BO]^{-1}[P_{00}] \qquad (7.158)$$

Như vậy, việc di chuyển từ vị trí điểm tựa P_0 đến vị trí điểm tựa P_1 dọc theo đoạn thẳng nối chúng với nhau, cấu hình của tay máy thay đổi từ

$$[T_6] = [BASE]^{-1}[BO][P_{01}][E]^{-1} \qquad (7.159)$$

sang cấu hình sau:

$$[T_6] = [BASE]^{-1} [BO][P_{11}][E]^{-1} \qquad (7.160).$$

7.5.4. Mô tả quỹ đạo qua các điểm tựa bằng đa thức bậc 3 có xét đến các hạn chế về động lực học.

Trên đây đã mô tả quỹ đạo qua các điểm tựa dùng Spline bậc 3 hoặc các đoạn thẳng nối liên tiếp chúng. Tuy nhiên cả 2 phương pháp đều chưa xét đến các hạn chế về lực và mômen, vận tốc và gia tốc của các bộ phận truyền dẫn ở các khớp động. Theo [7] dùng đa thức bậc 3 để mô tả quỹ đạo qua các điểm tựa và chú ý đến các yếu tố động lực học này từ đầu thì có thể nhận được quỹ đạo chuyển động trơn tru và đều hoà.

Ký hiệu $Q_{ji}(t)$ là đa thức bậc 3 biểu diễn sự biến thiên của biến khớp (toạ độ suy rộng) thứ j giữa 2 điểm tựa B_i và B_{i+1} trong khoảng thời gian $[t_i , t_{i+1}]$. Vấn đề là phải "nối ghép" các đa thức Q_{ji} này lại (i = 1,2, ...n-1) sao cho quỹ đạo phải đi qua các điểm tựa và đảm bảo tính liên tục về hành trình, vận tốc, gia tốc trong suốt khoảng thời gian $[t_1 , t_n]$.

Vì $Q_{ji}(t)$ là đa thức bậc 3 nên đạo hàm bậc 2 của chúng là hàm bậc nhất theo thời gian t:

$$\ddot{Q}_{ji}(t) = \frac{t_{i+1} - t}{u_i}\ddot{Q}_{ji}(t_i) + \frac{(t - t_i)}{u_i}\ddot{Q}_{ji}(t_{i+1}) \qquad (7.161)$$

với $i = 1, 2, \ldots n-1;$

$j = 1, 2, \ldots N$

u_i - thời gian di chuyển trên đoạn đường thứ i, $u_i = t_{i+1} - t_i$.

Lấy tích phân 2 lần với các điều kiện biên:

$$Q_{ji}(t_i) = q_{ji}; \quad Q_{ji}(t_{i+1}) = q_{j,i+1}$$

ta có:

$$Q_{ji}(t) = \frac{\ddot{Q}_{ji}(t_i)}{6u_i}(t_{i+1} - t)^3 + \frac{\ddot{Q}_{ji}(t_{i+1})}{6u_i}(t - t_i)^3 + \left[\frac{q_{j,i+1}}{u_i} - \frac{u_i\ddot{Q}_{ji}(t_{i+1})}{6}\right](t - t_i) + \left[\frac{q_{j,i}}{u_i} - \frac{u_i\ddot{Q}_{ji}(t_i)}{6}\right](t_{i+1} - t) \qquad (7.162)$$

$i = 1,2, \ldots n - 1; \qquad j = 1,2, \ldots N$

Như vậy đối với các điểm i = 1, 2, ... n-1 thì $Q_{ji}(t)$ là xác định nếu biết các đạo hàm bậc 2 của chúng tại các thời điểm t_i và t_{i+1}.

Trên cơ sở đó ta có (n - 2) phương trình tuyến tính với ẩn số $Q_{ji}(t_i)$, i = 2 ... n-1:

$$A\ddot{Q} = b$$

$$\ddot{Q} = \begin{bmatrix} Q_{j2}(t_2) \\ Q_{j3}(t_3) \\ \vdots \\ \ddot{Q}_{j,n-1}(t_{n-1}) \end{bmatrix} \tag{7.163}$$

$$A = \left[\begin{matrix} 3u_1 + 2u_2 + \dfrac{u_1^2}{u_2} & u_2 & 0 & 0 \\ u_2 - \dfrac{u_1^2}{u_2} & 2(u_2 + u_3) & u_3 & . \\ 0 & u_3 & 2(u_3 + u_4) & . \\ . & . & u_4 & 2(u_4 + u_{n-3}) \\ . & . & 0 & . \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix}\right.$$

$$\left.\begin{matrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ . & . & . & . \\ . & . & . & . \\ . & u_{n-3} & . & . \\ . & . & 2(u_{n-3} + u_{n-2}) & .u_{n-2} - \dfrac{u_{n-1}^2}{u_{n-2}} \\ 0 & 0 & u_{n-2} & 3u_{n-1} + 2u_{n-2} + \dfrac{u_{n-1}^2}{u_{n-2}} \end{matrix}\right]$$

$$
b = \begin{bmatrix}
6\left[\dfrac{q_{j3}}{u_2} + \dfrac{q_{j1}}{u_1}\right] - 6\left[\dfrac{1}{u_1} + \dfrac{1}{u_2}\right]\left[q_{j1} + u_1 v_{j1} + \dfrac{u_1^2}{3} a_{j1}\right] - u_1 a_{j1}, \\
\dfrac{6}{u_2}\left[q_{j1} + u_1 v_{j1} + \dfrac{u_1^2}{3} a_{j1}\right] + \dfrac{6q_{j4}}{u_3} - 6\left[\dfrac{1}{u_2} + \dfrac{1}{u_3}\right] q_{j3} \\
6\left[\dfrac{q_{j5} - q_{j4}}{u_4} - \dfrac{q_4 - q_{j3}}{u_3}\right] \\
6\left[\dfrac{q_{j5} - q_{j4}}{u_4} - \dfrac{q_4 - q_{j3}}{u_3}\right] \\
\vdots \\
\dfrac{6}{u_{n-2}}\left[q_{jn} - v_{jn} u_{n-1} + \dfrac{u_{n-1}^2}{3} a_{jn}\right] - \\
-6\left[\dfrac{1}{u_{n-2}} + \dfrac{1}{u_{n-3}}\right] q_{j,n-2} + \dfrac{6}{u_{n-3}} q_{j,n-3} - \\
-6\left[\dfrac{1}{u_{n-1}} + \dfrac{1}{u_{n-2}}\right]\left[q_{jn} - v_{jn} u_{n-1} + \dfrac{u_{n-1}^2}{3} a_{jn}\right] + \\
+\dfrac{6q_{jn}}{u_{n-1}} + 6\dfrac{q_{n-2}}{u_{n-1}u_{n-2}} - u_{n-1} a_{jn}
\end{bmatrix}
$$

Nếu u_i luôn luôn dương, từ phương trình (6.163) ta có:

$$
\ddot{Q} = A^{-1} b \qquad (7.164)
$$

và sau khi thay vào (7.162) sẽ nhận được biểu thức xác định $Q_{ji}(t)$. Như vậy $Q_{ji}(t)$ phụ thuộc vào khoảng thời gian u_i, vào các giá trị của biến khớp, của vận tốc và gia tốc tại các điểm tựa.

Để tăng năng suất thao tác, tay máy phải thực hiện quỹ đạo chuyển dịch với thời gian ngắn nhất. Có thể đặt bài toán tối ưu chọn khoảng thời gian u_i sao cho tổng thời gian T là min trong phạm vi giới hạn về vận tốc, gia tốc và lực suy rộng.

Hàm mục tiêu:

$$T = \Sigma u_i \qquad \rightarrow \min \qquad (7.165)$$

Giới hạn về vận tốc:

$$\left[\dot{Q}_{ji}(t)\right] \le V_j \qquad j = 1,2,\dots,N$$

$$i = 1,2,\dots,n-1.$$

Giới hạn về gia tốc:

$$\left[\dot{Q}_{ji}(t)\right] \le V_j \qquad j = 1,2,\dots,N$$

$$i = 1,2,\dots,n-1.$$

Giới hạn về lực:

$$[F_{Mj}] \le F_j \qquad j = 1,2,\dots N$$

Trong đó V_j; A_j và F_j là các giá trị giới hạn về vận tốc, gia tốc và lực suy rộng đối với khớp động thứ j.

Các điều kiện giới hạn nói trên có thể viết chi tiết hơn như sau:

Giới hạn về vận tốc:

Lấy vi phân biểu thức (6.162) và đặt:

$$\ddot{Q}_{ji}(t_i) = \omega_{ji} \qquad (7.166)$$

$$\ddot{Q}(t_{i+1}) = \omega_{ji+1} \qquad (7.167)$$

ta có:

$$\dot{Q}_{ji}(t) = \frac{\omega_{ji}}{2u_i}(t_{i+1} - t)^2 + \frac{\omega_{j,i+1}}{2u_i}(t - t_i)^2 + \\ + \left[\frac{q_{j,i+1}}{u_i} - \frac{u_i\omega_{j,i+1}}{6}\right] - \left[\frac{q_{ji}}{u_i} - \frac{u_i\omega_{ji}}{6}\right] \qquad (7.168)$$

$$\ddot{Q}_{ji}(t) = \frac{\omega_{j,i+1}}{u_i}(t - t_i) - \frac{\omega_{ji}}{u_i}(t - t_{i+1}) \qquad (7.169)$$

Trong đó ω_{ji} - gia tốc góc tính bằng (7.166) tại điểm tựa B_i ở thời gian t_i. Trong khoảng thời gian $[t_i, t_{i+1}]$ vận tốc có thể đạt cực đại tại thời điểm t^*_i nào đó. Tại thời điểm t^*_i này ta có:

$$\ddot{Q}_{ji}(t_i^*) = 0 \qquad (7.170)$$

Như vậy điều kiện giới hạn về vận tốc có thể biểu thị như sau:

$$\max_{t\in[i,ti+1]} |\dot{Q}_{ji}| = \max\left[|\dot{Q}_{ji}(t_i)|, \quad |\dot{Q}_{ji}(t_{i+1})|, \quad |\dot{Q}_{ji}(t_i^*)|\right] \le V_i \qquad (7.171)$$

$$i = 1,2,\dots,n-1; \qquad j = 1,2,\dots,N$$

Trong đó:

$$|\dot{Q}_{ji}(t_i)| = \left|\frac{\omega_{ji}}{2}u_i + \frac{q_{j,i+1} - q_{ji}}{u_i} + \frac{(\omega_{ji} - \omega_{j,i+1})u_i}{6}\right|$$

$$|\dot{Q}_{ji}(t_{i+1})| = \left|\frac{\omega_{j,i+1}}{2}u_i + \frac{q_{j,i+1} - q_{ji}}{u_i} + \frac{(\omega_{ji} - \omega_{j,i+1})}{6}u_i\right|$$

$$\dot{Q}_{ji}(t_i^*) = \begin{cases} \left|\dfrac{\omega_{ji}\omega_{j,i+1}u_i}{2(\omega_{ji} - \omega_{j,i+1})} + \dfrac{(\omega_{ji} - \omega_{j,i+1})u_i}{6} + \dfrac{q_{j,i+1} - q_{ji}}{u_i}\right| & \text{Nếu } \omega_{ji} \ne \omega_{j,i+1} \quad t_i^* \in [t_i, t_{i+1}] \\ 0 & \text{Nếu } \omega_{ji} = \omega_{j,i+1} \quad t_i^* \notin [t_i, t_{i+1}] \end{cases}$$

Giới hạn về gia tốc :

Với quỹ đạo hành trình đã biểu thị bằng các đa thức bậc 3 thì quan hệ gia tốc theo thời gian là hàm bậc nhất, cho nên trong khoảng thời gian $[t_i, t_{i+1}]$ gia tốc lớn nhất đạt hoặc ở thời điểm t_i hoặc t_{i+1} và bằng giá trị lớn nhất trong 2 giá trị $|\omega_{ji}|$ và $|\omega_{j,i+1}|$.

Vậy điều kiện giới hạn về gia tốc có dạng sau:

$$\text{Max}\left\{|\omega_{j1}|, |\omega_{j2}|, |\omega_{j3}|, \dots\dots\dots |\omega_{jn}|\right\} \le A_i \qquad (7.172)$$

$$j = 1,2,3,\dots\dots\dots,N$$

Giới hạn về lực sẽ được khảo sát ở chương sau.

CHƯƠNG VIII

ĐỘNG LỰC HỌC ROBOT

8.1. NHIỆM VỤ VÀ PHƯƠNG PHÁP PHÂN TÍCH ĐỘNG LỰC HỌC ROBOT.

Nghiên cứu động lực học robot là giai đoạn cần thiết trong việc phân tích cũng như tổng hợp quá trình điều khiển chuyển động. Trong nghiên cứu động lực học robot thường giải quyết hai nhiệm vụ sau đây:

+ Nhiệm vụ thứ nhất là xác định mômen và lực động xuất hiện trong quá trình chuyển động. Khi đó quy luật biến đổi của biến khớp $q_i(t)$ xem như đã biết.

Tính toán lực trong cơ cấu tay máy là việc rất cần thiết khi chọn lựa động cơ, khi kiểm tra độ bền, độ cứng vững và tin cậy của tay máy.

+ Nhiệm vụ thứ hai là xác định các sai số động tức là độ lệch so với quy luật chuyển động theo chương trình. Lúc này phải khảo sát các phương trình chuyển động của cơ cấu tay máy, đồng thời xem xét các đặc tính động lực của động cơ.

Có nhiều phương pháp nghiên cứu động lực học robot, nhưng thường gặp hơn là phương pháp động tĩnh học và phương pháp dùng phương trình Lagrange bậc 2.

Phương pháp động tĩnh học xây dựng trên nguyên lí D'Alembert cho phép xác định các lực truyền dẫn để thực hiện chuyển động của bàn kẹp cùng vật kẹp, đồng thời cho phép xác định lực quán tính trong các khớp.

Phương pháp dùng phương trình Lagrange để xây dựng mô hình động học robot cũng là phương pháp hiệu quả và thuận tiện cho việc xây dựng thuật toán giải trên máy tính, cả đối với trường hợp xét tới tính đàn hồi của các khâu.

Dưới đây áp dụng phương pháp dùng phương trình Lagrange bậc 2 để xây dựng mô hình động lực học của robot. Đồng thời với việc sử dụng mô hình động học kiểu DH (Denavit - Hartenberg) có thể nhận được các phương trình động lực học robot ở dạng vectơ ma trận, rất gọn nhẹ và thuận tiện cho việc nghiên cứu giải tích và tính toán trên máy tính.

Các phương trình động lực học robot được thiết lập dựa trên cơ sở phương trình Lagrange bậc 2:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}\right)-\frac{\partial L}{\partial q_i}=F_{Mi}, \qquad i=1,2,\ldots,n. \qquad (8.1)$$

Trong đó: L - hàm Lagrange $\qquad L = K - P,$ (8.2)

K và P - động năng và thế năng của cơ hệ.

F_{Mi} - động lực, hình thành trong khớp động thứ i khi thực hiện chuyển động.

q_i - biến khớp (hoặc toạ độ suy rộng).

$\dot{q}_i$ - đạo hàm bậc nhất của biến khớp theo thời gian.

Đồng thời khi mô tả vị trí tương đối giữa hai hệ toạ độ thứ i và (i-1) dùng ma trận thuần nhất A_i, hoặc viết đầy đủ hơn là ${}^{i-1}A_i$. Dùng ma trận này có thể mô tả vị trí trạng thái trong hệ toạ độ thứ i-1 của một điểm bất kì thuộc hệ toạ độ thứ i.

Các biến khớp q_i hoặc còn gọi là toạ độ suy rộng là bộ các thông số dịch chuyển của các khớp động của robot. Vị trí trạng thái của điểm tác động cuối của robot hoàn toàn được xác định bởi bộ biến khớp q_i này. Trong trường hợp khớp quay thì q_i trùng với góc quay θ_i của khớp, còn đối với khớp tịnh tiến thì q_i trùng với độ tịnh tiến d_i của khớp.

8.2. VẬN TỐC VÀ GIA TỐC.

Để xây dựng mô hình động lực học robot dùng phương trình Lagrange bậc 2, cần biết vận tốc của điểm bất kì trên tay máy.

Điểm M nào đó trong hệ toạ độ i, xác định bằng vectơ mở rộng ${}^i\mathbf{r}_i$:

$${}^i\mathbf{r}_i = (x_i, y_i, z_i, 1)^T, \qquad (8.3)$$

Kí hiệu ${}^i\mathbf{r}_i$ có nghĩa là điểm M cho biết trong hệ toạ độ i và được biểu thị cũng trong hệ toạ độ i. Còn khi dùng kí hiệu ${}^0\mathbf{r}_i$ thì có nghĩa là điểm M cho biết trong hệ toạ độ i, nhưng được biểu thị trong hệ toạ độ x_0, y_0, z_0, tức là trong hệ toạ độ cơ bản.

Như trước đây, dùng ma trận ${}^{i-1}A_i$ để mô tả vị trí tương đối giữa hệ toạ độ thứ i đối với hệ toạ độ thứ i-1 và ma trận ${}^0A_i$ để mô tả quan hệ giữa hệ toạ độ thứ i và hệ toạ độ cơ bản.

Vậy quan hệ giữa ${}^0\mathbf{r}_i$ và ${}^{i-1}\mathbf{r}_i$ có thể biểu thị như sau:

$${}^0\mathbf{r}_i = {}^0A_i\,{}^i\mathbf{r}_i, \qquad (8.4)$$

với $$^0A_i = {}^0A_1\,{}^1A_2 \dots {}^{i-1}A_i \qquad (8.5)$$

Ma trận $^{i-1}A_i$ đã có từ biểu thức (4.11)

$$^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} C_{\theta i} & -C_{\alpha i}S_{\theta i} & S_{\alpha i}S_{\theta i} & a_iC_{\theta i} \\ S_{\theta i} & C_{\alpha i}C_{\theta i} & -S_{\alpha i}C_{\theta i} & a_iS_{\theta i} \\ 0 & S_{\alpha i} & C_{\alpha i} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (8.6)$$

Biểu thức (8.6) là viết cho trường hợp khớp quay i, còn nếu khớp động i là khớp tịnh tiến thì $a_i = 0$ và từ (8.6) ta có:

$$^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} C_{\theta i} & -C_{\alpha i}S_{\theta i} & S_{\alpha i}S_{\theta i} & 0 \\ S_{\theta i} & C_{\alpha i}C_{\theta i} & -S_{\alpha i}C_{\theta i} & 0 \\ 0 & S_{\alpha i} & C_{\alpha i} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (8.7)$$

Đối với khớp quay thì θ_i là biến khớp và đối với khớp tịnh tiến thì d_i là biến khớp.

Các phần tử khác không của ma trận ^0A_i đều là hàm của θ_j, d_j, α_j và a_j ($j = 1, 2, \dots, i$). Trong đó α_j và a_j lại là những thông số xác định bằng cấu trúc cụ thể của tay máy. Do vậy các phần tử này là hàm của biến khớp q_i nói chung ($q_i \equiv \theta_i$ đối với khớp quay và $q_i \equiv d_i$ đối với khớp tịnh tiến).

Vi phân biểu thức (8.4) với lưu ý rằng vectơ $^i\mathbf{r}_i$ là không đổi với hệ toạ độ thứ i vì giả thiết rằng các khâu của tay máy là vật rắn tuyệt đối, ta có:

$$^0\mathbf{V}_i \equiv \mathbf{V}_i = \frac{d}{dt}(^0\mathbf{r}_i) = \frac{d}{dt}(^0A_i\,{}^i\mathbf{r}_i) =$$
$$= {}^0\dot{A}_1\,{}^1A_2 \dots {}^{i-1}A_i\,{}^i\mathbf{r}_i + {}^0A_1\,{}^1\dot{A}_2 \dots {}^{i-1}A_i\,{}^i\mathbf{r}_i + \dots$$
$$\dots + {}^0A_1 \dots {}^{i-1}\dot{A}_i\,{}^i\mathbf{r}_i + {}^0A_i\,{}^i\dot{\mathbf{r}}_i$$
$$^0\mathbf{V}_i = \left[\sum_{j=1}^{i} \frac{\partial\,{}^0A_i}{\partial q_j}\dot{q}_j\right]{}^i\mathbf{r}_i \qquad (8.8)$$

Đạo hàm của ma trận $^{i-1}A_i$ đối với biến khớp q_i có thể dễ dàng xác định theo công thức sau:

$$\frac{d^{i-1}A_i}{dq_i} = D_i\,{}^{i-1}A_i \tag{8.9}$$

Trong đó đối với khớp quay:

$$D_i = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{8.10}$$

và đối với khớp tịnh tiến:

$$D_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{8.11}$$

Trong trường hợp i = 1, 2, ... , n ta có:

$$\frac{\partial^0 A_i}{\partial q_j} = \frac{\partial}{\partial q_j}(A_1A_2...A_{j-1}A_j...A_{i-1}A_i) \tag{8.12}$$

Trong các ma trận bên vế phải chỉ có A_j phụ thuộc vào q_j, do đó theo (8.9) ta có:

$$\frac{\partial^0 A_i}{\partial q_j} = A_1A_2...A_{j-1}\frac{dA_j}{dq_j}...A_{i-1}A_i \tag{8.13}$$

với D_j tính theo (8.10) hoặc (8.11).

$$\frac{\partial^0 A_i}{\partial q_j} = A_1A_2...A_{j-1}D_jA_j...A_{i-1}A_i \tag{8.14}$$

Phương trình (8.14) mô tả sự thay đổi vị trí các điểm của khâu thứ i gây nên bởi sự chuyển dịch của khớp động thứ j.

Kí hiệu vế trái của (8.14) là U_{ij} và đơn giản hoá cách viết (8.14) như sau:

$$U_{ij} = \begin{cases} {}^0A_{j-1}D_j\,{}^{j-1}A_i & \text{nếu} \quad j \le i \\ 0 & \text{nếu} \quad j > i \end{cases} \qquad (8.15)$$

Vậy công thức (7.8) có thể viết lại là:

$$V_i = \left[\sum_{j=1}^{i} U_{ij}\dot{q}_j\right]{}^i\mathbf{r}_i, \qquad (8.16)$$

Tiếp theo, từ biểu thức (7.8) xác định gia tốc:

$$\mathbf{a} = \frac{d\mathbf{V}_i}{dt} = \left[\sum_{s=1}^{i}\frac{\partial\,{}^0A_i}{\partial q_s}\ddot{q}_s + \sum_{s=1}^{i}\sum_{k=1}^{i}\frac{\partial^2\,{}^0A_i}{\partial q_s\partial q_k}\dot{q}_s\dot{q}_k\right]{}^i\mathbf{r}_i, \qquad (8.17)$$

8.3. ĐỘNG NĂNG TAY MÁY.

Kí hiệu K_i là động năng của khâu i (i=1, 2, ..., n) và dK_i là động năng của một chất điểm khối lượng dm thuộc khâu i:

$$dK_i = \frac{1}{2}(\dot{x}_i^2 + \dot{y}_i^2 + \dot{z}_i^2)dm = \frac{1}{2}Tr(\mathbf{V}_i\mathbf{V}_i^T)dm \qquad (8.18)$$

Trong đó Tr là vết của ma trận:

$$TrA = \sum_{i=1}^{n} a_{ii}$$

Thay vào (7.18) biểu thức (7.16) đối với $\mathbf{V}_i$ ta có:

$$\begin{aligned} dK_i &= \tfrac{1}{2}Tr\left[\sum_{p=1}^{i}U_{ip}\dot{q}_p{}^i\mathbf{r}_i\left[\sum_{r=1}^{i}U_{ir}\dot{q}_r{}^i\mathbf{r}_i\right]^T\right]dm = \\ &= \tfrac{1}{2}Tr\left[\sum_{p=1}^{i}\sum_{r=1}^{i}U_{ip}{}^i\mathbf{r}_i{}^i\mathbf{r}_i^T U_{ir}^T\dot{q}_p\dot{q}_r\right]dm = \\ &= \tfrac{1}{2}Tr\left[\sum_{p=1}^{i}\sum_{r=1}^{i}U_{ip}({}^i\mathbf{r}_i dm\,{}^i\mathbf{r}_i^T)U_{ir}^T\dot{q}_p\dot{q}_r\right]. \end{aligned} \qquad (8.19)$$

Như đã nói ở trên ma trận U_{ij} biểu thị sự thay đổi vị trí của các điểm thuộc khâu i gây nên bởi sự chuyển dịch của khớp động j. Ma trận này đều như nhau ở mọi điểm thuộc khâu i và không phụ thuộc vào sự phân bố khối lượng trên khâu i, tức là không phụ thuộc vào dm. Cũng vậy, đạo hàm của biến khớp q_i theo thời gian không phụ thuộc vào dm. Do vậy ta có:

$$K_i = \int dK_i = \frac{1}{2}\mathrm{Tr}\left[\sum_{p=1}^{i}\sum_{r=1}^{i} U_{ip}\left(\int {}^i\mathbf{r}_i {}^i\mathbf{r}_i^T dm\right) U_{ir}^T \dot{q}_p \dot{q}_r\right]. \qquad (8.20)$$

Phần trong ngoặc đơn là ma trận quán tính J_i của khâu i:

$$J_i = \int {}^i\mathbf{r}_i {}^i\mathbf{r}_i^T dm = \begin{bmatrix} \int x_i^2 dm & \int x_i y_i dm & \int x_i z_i dm & \int x_i dm \\ \int x_i y_i dm & \int y_i^2 dm & \int y_i z_i dm & \int y_i dm \\ \int x_i z_i dm & \int y_i z_i dm & \int z_i^2 dm & \int z_i dm \\ \int x_i dm & \int y_i dm & \int z_i dm & \int dm \end{bmatrix}. \qquad (8.21)$$

Nếu dùng Tenso quán tính I_{ij}:

$$I_{ij} = \int\left[\delta_{ij}\left[\sum_k x_k^2\right] - x_i x_j\right]dm, \qquad (8.22)$$

với các chỉ số i, j, k lấy lần lượt bằng các giá trị x_i, y_i, z_i, đó là các trục của hệ toạ độ i, và δ_{ij} là kí hiệu Cronecke, thì ma trận J_i có thể biểu thị ở dạng sau:

$$J_i = \begin{bmatrix} \frac{-I_{xx}+I_{yy}+I_{zz}}{2} & I_{xy} & I_{xz} & m_i\bar{x}_i \\ I_{xy} & \frac{I_{xx}-I_{yy}+I_{zz}}{2} & I_{yz} & m_i\bar{y}_i \\ I_{xz} & I_{yz} & \frac{I_{xx}+I_{yy}-I_{zz}}{2} & m_i\bar{z}_i \\ m_i\bar{x}_i & m_i\bar{y}_i & m_i\bar{z}_i & m_i \end{bmatrix} \qquad (8.23)$$

Ở đây ${}^i\bar{\mathbf{r}}_i = (\bar{x}_i, \bar{y}_i, \bar{z}_i, 1)^T$ - bán kính vectơ biểu diễn trọng tâm của khâu thứ i trong hệ toạ độ i. Công thức (8.23) viết thành:

$$J_i = m_i\begin{bmatrix} \frac{-k_{i11}^2+k_{i22}^2+k_{i33}^2}{2} & k_{i12}^2 & k_{i13}^2 & \bar{x}_i \\ k_{i12}^2 & \frac{k_{i11}^2-k_{i22}^2+k_{i33}^2}{2} & k_{i23}^2 & \bar{y}_i \\ k_{i13}^2 & k_{i23}^2 & \frac{k_{i11}^2+k_{i22}^2-k_{i33}^2}{2} & \bar{z}_i \\ \bar{x}_i & \bar{y}_i & \bar{z}_i & 1 \end{bmatrix}. \qquad (8.24)$$

Ở đây $K_{ijk} = I_{jk}/m_i$ và j = 1, 2, 3; k = 1, 2, 3

${}^i\bar{\mathbf{r}}_i = (\bar{x}_i, \bar{y}_i, \bar{z}_i, 1)^T$ - bán kính véctơ biểu diễn trọng tâm của khâu thứ i trong hệ toạ độ i.

Vậy, động năng của toàn cơ cấu tay máy bằng tổng đại số động năng của các khâu động:

$$K = \sum_{i=1}^{n} K_i = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n} Tr\left[\sum_{p=1}^{i}\sum_{r=1}^{i} U_{ip} J_i U_{ir}^T \dot{q}_p \dot{q}_r\right] =$$

$$= \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}\sum_{p=1}^{i}\sum_{r=1}^{i}\left[Tr(U_{ip} J_i U_{ir}^T)\dot{q}_p \dot{q}_r\right] \qquad (8.25)$$

Lưu ý rằng, các ma trận J_i (i = 1, 2, ..., n) chỉ phụ thuộc vào sự phân bố khối lượng của khâu i trong hệ toạ độ i mà không phụ thuộc vào vị trí và vận tốc. Vì thế cần tính ma trận J_i chỉ một lần.

8.4. THẾ NĂNG TAY MÁY.

Thế năng P_i của khâu i:

$$P_i = -m_i \mathbf{g}\, {}^0\mathbf{r}_i = -m_i \mathbf{g}\, ({}^0A_i\, {}^i\mathbf{r}_i) \qquad (8.26)$$

i = 1, 2, ..., n

Trong đó

${}^i\mathbf{r}_i$ và ${}^0\mathbf{r}_i$ - bán kính vectơ biểu diễn trọng tâm của khâu i trong hệ toạ độ cơ bản.

$\mathbf{g}$ - vectơ gia tốc trọng trường, $\mathbf{g}$ = (0, 0, -g, 0) (gia tốc trọng trường g = 9,8062 m/s^2).

Thế năng của toàn cơ cấu n khâu động:

$$P = \sum_{i=1}^{n} P_i = -\sum_{i=1}^{n} m_i \mathbf{g}({}^0A_i\, {}^i\bar{\mathbf{r}}_i). \qquad (8.27)$$

8.5. MÔ HÌNH ĐỘNG LỰC HỌC TAY MÁY.

Để xây dựng mô hình động lực học tay máy dùng phương trình Lagrange bậc 2 (phương trình 8.1):

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}}\right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = F_{Mi}, \qquad i = 1,2,\ldots,n$$

Phương trình trên cho biểu thức tính động lực F_{Mi}. Đó là lực hoặc mômen tạo nên bởi nguồn động lực ở khớp động i để thực hiện chuyển động của khâu i.

Thay (8.25), (8.27) vào (8.1), cuối cùng ta có:

$$F_{Mi} = \sum_{j=i}^{n}\sum_{k=1}^{j} Tr(U_{jk}J_jU_{ji}^T)\ddot{q}_k + \sum_{j=i}^{n}\sum_{k=1}^{j}\sum_{m=1}^{j} Tr(U_{jkm}J_jU_{ji}^T)\dot{q}_k\dot{q}_m - \sum_{j=i}^{n} m_j g U_{ji}\,{}^j\bar{r}_j \qquad (8.28)$$

$$i = 1,2,\ldots,n$$

Biểu thức (8.28) có thể viết gọn lại như sau:

$$F_{Mi} = \sum_{k=1}^{n} D_{ik}\ddot{q}_k + \sum_{k=1}^{n}\sum_{m=1}^{n} h_{ikm}\dot{q}_k\dot{q}_m + c_i \qquad (8.29)$$

hoặc là dưới dạng ma trận:

$$F_M = D(q).\ddot{q} + h(q,\dot{q}) + c(q) \qquad (8.30)$$

Trong đó:

$F_M(t)$ - vectơ (nx1) lực động, tạo nên ở n khớp động:

$$F_M(t) = [F_{M1}(t), F_{M2}(t), \ldots F_{Mn}(t)]^T \qquad (8.31)$$

q(t) - vectơ (nx1) biến khớp:

$$q(t) = [q_1(t), q_2(t), \ldots q_n(t)]^T \qquad (8.32)$$

$\dot{q}(t)$ - vectơ (nx1) tốc độ thay đổi biến khớp:

$$\dot{q}(t) = [\dot{q}_1(t), \dot{q}_2(t), \ldots \dot{q}_n(t)]^T \qquad (8.33)$$

$\ddot{q}(t)$ - vectơ (nx1) gia tốc biến khớp:

$$\ddot{q}(t) = [\ddot{q}_1(t), \ddot{q}_2(t), \ldots, \ddot{q}_n(t)]^T \qquad (8.34)$$

D(q) - ma trận (nxn), có các phần tử D_{ik} sau đây:

$$D_{ik} = \sum_{j=\max(i,k)}^{n} Tr(U_{jk}J_jU_{ji}^T) \quad i, k = 1, 2, \ldots n \qquad (8.35)$$

$h(q, \dot{q})$ - vectơ (nx1) lực ly tâm và Coriolit

$$h(q,\ddot{q}) = (h_1, h_2, \ldots, h_n)^T$$

$$h_i = \sum_{k=1}^{n}\sum_{m=1}^{n} h_{ikm}\dot{q}_k\dot{q}_m, \qquad i = 1,2,\ldots,n \tag{8.36}$$

$$h_{ikm} = \sum_{j=\max(i,k,m)}^{n} Tr(U_{jkm} J_j U_{ji}^T) \qquad i,k,m = 1,2,\ldots,n \tag{8.37}$$

$c(q)$ - vectơ (nx1) lực trọng trường.

$$c(q) = (c_1, c_2, \ldots, c_n)^T$$

$$c_i = \sum_{j=i}^{n}(-m_j g U_{ji}\, {}^j\bar{r}_j) \tag{8.38}$$

8.6 CÁC PHƯƠNG TRÌNH ĐỘNG LỰC HỌC CƠ CẤU TAY MÁY TOÀN KHỚP QUAY.

Trong phần này tiến hành cụ thể hoá các biểu thức từ (8.30) đến (8.38) cho trường hợp cơ cấu tay máy 6 bậc tự do toàn khớp quay. Ở đây các biến khớp q_i đều bằng θ_i.

Ma trận $D(\theta)$ - xuất phát từ (8.35), ta có:

$$D(\theta) = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} & D_{14} & D_{15} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{23} & D_{24} & D_{25} & D_{26} \\ D_{13} & D_{23} & D_{33} & D_{34} & D_{35} & D_{36} \\ D_{14} & D_{24} & D_{34} & D_{44} & D_{45} & D_{46} \\ D_{15} & D_{25} & D_{35} & D_{45} & D_{55} & D_{56} \\ D_{16} & D_{26} & D_{36} & D_{46} & D_{56} & D_{66} \end{bmatrix} \tag{8.39}$$

$$D_{11} = Tr(U_{11}J_1U_{11}^T) + Tr(U_{21}J_2U_{21}^T) + Tr(U_{31}J_3U_{31}^T) + Tr(U_{41}J_4U_{41}^T) + $$
$$+ Tr(U_{51}J_5U_{51}^T) + Tr(U_{61}J_6U_{61}^T)$$

$$D_{12} = D_{21} = Tr(U_{22}J_2U_{21}^T) + Tr(U_{32}J_3U_{31}^T) + Tr(U_{42}J_4U_{41}^T) +$$
$$+ Tr(U_{52}J_5U_{51}^T) + Tr(U_{62}J_6U_{61}^T)$$

$$D_{13} = D_{31} = Tr(U_{33}J_3U_{31}^T) + Tr(U_{43}J_4U_{41}^T) + Tr(U_{53}J_5U_{51}^T) +$$
$$+ Tr(U_{63}J_6U_{61}^T),$$

$$D_{14} = D_{41} = Tr(U_{44}J_4U_{41}^T) + Tr(U_{54}J_5U_{51}^T) + Tr(U_{64}J_6U_{61}^T)$$

$$D_{15} = D_{51} = Tr(U_{55}J_5U_{51}^T) + Tr(U_{65}J_6U_{61}^T)$$

$D_{16} = D_{61} = Tr(\mathbf{U}_{66}\mathbf{J}_6\mathbf{U}_{61}^T)$

$D_{22} = Tr(\mathbf{U}_{22}\mathbf{J}_2\mathbf{U}_{22}^T) + Tr(\mathbf{U}_{32}\mathbf{J}_3\mathbf{U}_{32}^T) + Tr(\mathbf{U}_{42}\mathbf{J}_4\mathbf{U}_{42}^T) + Tr(\mathbf{U}_{52}\mathbf{J}_5\mathbf{U}_{52}^T) +$
$\quad + Tr(\mathbf{U}_{62}\mathbf{J}_6\mathbf{U}_{62}^T)$

$D_{23} = D_{32} = Tr(\mathbf{U}_{33}\mathbf{J}_3\mathbf{U}_{32}^T) + Tr(\mathbf{U}_{43}\mathbf{J}_4\mathbf{U}_{42}^T) + Tr(\mathbf{U}_{53}\mathbf{J}_5\mathbf{U}_{52}^T) +$
$\quad + Tr(\mathbf{U}_{63}\mathbf{J}_6\mathbf{U}_{62}^T)$

$D_{24} = D_{42} = Tr(\mathbf{U}_{44}\mathbf{J}_4\mathbf{U}_{42}^T) + Tr(\mathbf{U}_{54}\mathbf{J}_5\mathbf{U}_{52}^T) + Tr(\mathbf{U}_{64}\mathbf{J}_6\mathbf{U}_{62}^T)$

$D_{25} = D_{52} = Tr(\mathbf{U}_{55}\mathbf{J}_5\mathbf{U}_{52}^T) + Tr(\mathbf{U}_{65}\mathbf{J}_6\mathbf{U}_{62}^T)$

$D_{26} = D_{62} = Tr(\mathbf{U}_{66}\mathbf{J}_6\mathbf{U}_{62}^T)$

$D_{33} = Tr(\mathbf{U}_{33}\mathbf{J}_3\mathbf{U}_{33}^T) + Tr(\mathbf{U}_{43}\mathbf{J}_4\mathbf{U}_{43}^T) + Tr(\mathbf{U}_{53}\mathbf{J}_5\mathbf{U}_{53}^T) + Tr(\mathbf{U}_{63}\mathbf{J}_6\mathbf{U}_{63}^T)$

$D_{34} = D_{43} = Tr(\mathbf{U}_{44}\mathbf{J}_4\mathbf{U}_{43}^T) + Tr(\mathbf{U}_{54}\mathbf{J}_5\mathbf{U}_{53}^T) + Tr(\mathbf{U}_{64}\mathbf{J}_6\mathbf{U}_{63}^T)$

$D_{35} = D_{53} = Tr(\mathbf{U}_{55}\mathbf{J}_5\mathbf{U}_{53}^T) + Tr(\mathbf{U}_{65}\mathbf{J}_6\mathbf{U}_{63}^T)$

$D_{36} = D_{63} = Tr(\mathbf{U}_{66}\mathbf{J}_6\mathbf{U}_{63}^T)$

$D_{44} = Tr(\mathbf{U}_{44}\mathbf{J}_4\mathbf{U}_{44}^T) + Tr(\mathbf{U}_{54}\mathbf{J}_5\mathbf{U}_{54}^T) + Tr(\mathbf{U}_{64}\mathbf{J}_6\mathbf{U}_{64}^T)$

$D_{45} = D_{54} = Tr(\mathbf{U}_{55}\mathbf{J}_5\mathbf{U}_{54}^T) + Tr(\mathbf{U}_{65}\mathbf{J}_6\mathbf{U}_{64}^T)$

$D_{46} = D_{64} = Tr(\mathbf{U}_{66}\mathbf{J}_6\mathbf{U}_{64}^T)$

$D_{55} = Tr(\mathbf{U}_{55}\mathbf{J}_5\mathbf{U}_{55}^T) + Tr(\mathbf{U}_{65}\mathbf{J}_6\mathbf{U}_{65}^T)$

$D_{56} = D_{65} = Tr(\mathbf{U}_{66}\mathbf{J}_6\mathbf{U}_{65}^T)$

$D_{66} = Tr(\mathbf{U}_{66}\mathbf{J}_6\mathbf{U}_{66}^T)$.

Vectơ $h(\theta, \dot{\theta})$ - Các hệ số h_{ikm} trong các biểu thức (8.36) và (8.37), có thể sắp xếp thành ma trận $H_{i,v}$ sau đây:

$$H_{i,v} = \begin{bmatrix} h_{i11} & h_{i12} & h_{i13} & h_{i14} & h_{i15} & h_{i16} \\ h_{i12} & h_{i22} & h_{i23} & h_{i24} & h_{i25} & h_{i26} \\ h_{i13} & h_{i23} & h_{i33} & h_{i34} & h_{i35} & h_{i36} \\ h_{i14} & h_{i24} & h_{i34} & h_{i44} & h_{i45} & h_{i46} \\ h_{i15} & h_{i25} & h_{i35} & h_{i45} & h_{i55} & h_{i56} \\ h_{i16} & h_{i26} & h_{i36} & h_{i46} & h_{i56} & h_{i66} \end{bmatrix} \quad i = 1,2,\ldots,6 \qquad (8.40)$$

Tương tự (8.33), ta viết:

$$\dot{\theta}(t) = \left[\dot{\theta}(t), \dot{\theta}_2(t), \ldots \dot{\theta}_6(t)\right]^T. \qquad (8.41)$$

Dùng (8.40) và (8.41), có thể biểu thị (8.36) ở dạng ma trận:

$$h_i = \dot{\theta}^T H_{i,v} \dot{\theta} \quad ; \quad i = 1,2,\ldots,6 \tag{8.42}$$

Như vậy vectơ $h(\theta, \dot{\theta})$ được biểu thị ở dạng sau:

$$h(\theta, \dot{\theta}) = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ h_4 \\ h_5 \\ h_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\theta}^T H_{1,v} \dot{\theta} \\ \dot{\theta}^T H_{2,v} \dot{\theta} \\ \dot{\theta}^T H_{3,v} \dot{\theta} \\ \dot{\theta}^T H_{4,v} \dot{\theta} \\ \dot{\theta}^T H_{5,v} \dot{\theta} \\ \dot{\theta}^T H_{6,v} \dot{\theta} \end{bmatrix} \tag{8.43}$$

Vectơ $c(\theta)$ trên cơ sở (8.38), ta có:

$$c(\theta) = (c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6)^T \tag{8.44}$$

$$\left.\begin{aligned}
c_1 &= -(m_1 g U_{11}^1 \bar{\mathbf{r}}_1 + m_2 g U_{21}^2 \bar{\mathbf{r}}_2 + m_3 g U_{31}^3 \bar{\mathbf{r}}_3 + m_4 g U_{41}^4 \bar{\mathbf{r}}_4 + m_5 g U_{51}^5 \bar{\mathbf{r}}_5 + \\
&\quad + m_6 g U_{61}^6 \bar{\mathbf{r}}_6) \\
c_2 &= -(m_2 g U_{22}^2 \bar{\mathbf{r}}_2 + m_3 g U_{32}^3 \bar{\mathbf{r}}_3 + m_4 g U_{42}^4 \bar{\mathbf{r}}_4 + m_5 g U_{52}^5 \bar{\mathbf{r}}_5 + m_6 g U_{62}^6 \bar{\mathbf{r}}_6) \\
c_3 &= -(m_3 g U_{33}^3 \bar{\mathbf{r}}_3 + m_4 g U_{43}^4 \bar{\mathbf{r}}_4 + m_5 g U_{53}^5 \bar{\mathbf{r}}_5 + m_6 g U_{63}^6 \bar{\mathbf{r}}_6) \\
c_4 &= -(m_4 g U_{44}^4 \bar{\mathbf{r}}_4 + m_5 g U_{54}^5 \bar{\mathbf{r}}_5 + m_6 g U_{64}^6 \bar{\mathbf{r}}_6) \\
c_5 &= -(m_5 g U_{55}^5 \bar{\mathbf{r}}_5 + m_6 g U_{65}^6 \bar{\mathbf{r}}_6) \\
c_6 &= -m_6 g U_{66}^6 \bar{\mathbf{r}}_6.
\end{aligned}\right\} \tag{8.45}$$

Các hệ số D_{ik}, h_{ikm} và c_i trong các biểu thức (8.35) ÷ (8.38) là hàm của biến khớp và của các thông số động lực học cơ cấu tay máy, cho nên gọi chúng là các hệ số động lực của tay máy. Ý nghĩa vật lý của các hệ số này có thể diễn giải như sau:

1) Các hệ số c_i xác định từ (8.38) biểu thị trọng lực tác dụng lên từng khâu của cơ cấu tay máy.

2) Các hệ số D_{ik} xác định từ (8.35), biểu thị các quan hệ giữa động lực với các gia tốc biến khớp. Trong trường hợp i=k, hệ số D_{ii} biểu thị quan hệ giữa lực động F_{Mi} tạo nên ở khớp i với gia tốc biến khớp i. Còn

khi $i \neq k$, thì hệ số D_{ik} biểu thị quan hệ giữa lực động F_{Mi} tạo nên ở khớp i với gia tốc biến khớp k.

Bởi vì ma trận quán tính là đối xứng và $Tr(A) = Tr(A^T)$, cho nên $D_{ik} = D_{ki}$

3) Các hệ số h_{ikm} xác định từ (8.36) và (8.37), biểu thị các quan hệ giữa lực động với tốc độ thay đổi giá trị biến khớp. Ngoài ra hệ số h_{ikm} còn biểu thị quan hệ giữa lực động, tạo nên ở khớp i, với tốc độ thay đổi biến khớp k và m.

Khi tính toán các hệ số này nên lưu ý rằng ở những trường hợp sau đây sẽ có các hệ số bằng 0:

1) Trong một số sơ đồ cơ cấu cụ thể của tay máy có thể loại trừ các ảnh hưởng lẫn nhau của lực động giữa các khớp (các hệ số D_{ij}, h_{ikm}).

2) Một số giá trị của các hệ số h_{ikm} tuy có mặt danh nghĩa trong các biểu thức (8.36) và (8.37), nhưng thực tế là bằng 0. Ví dụ, hệ số h_{iii} luôn luôn bằng 0, bởi vì lực ly tâm tạo ra do sự chuyển dịch của khớp i thì không ảnh hưởng trực tiếp đến lực trong khớp i nữa.

3) Một số hệ số động lực của tay máy, ở một vài thời điểm nào đó có khi thay đổi cấu hình tay máy, có thể lấy bằng 0.

Các phương trình động lực (8.30) là những phương trình vi phân phi tuyến bậc hai. Các phương trình trên có thể vận dụng để giải quyết các nhiệm vụ sau đây:

Khi biết lực động F_{Mi} ở từng khớp và từng thời điển, trên cơ sở các phương trình động lực nói về nguyên tắc có thể tìm ra quy luật thay đổi các giá trị biến khớp q(t) theo thời gian. Rồi tiếp theo đó, từ bộ giá trị q(t) sẽ xác định được quy luật thay đổi theo thời gian của vị trí bàn kẹp tức là xác định được quỹ đạo chuyển động của bàn kẹp.

Ngược lại, nếu cho biết chương trình chuyển động, tức là cho biết q(t) và các đạo hàm bậc nhất, bậc 2 theo thời gian của q(t), trên cơ sở các phương trình động lực nói trên có thể xác định F_{Mi} tác động lên từng khớp động ở các thời điểm khác nhau.

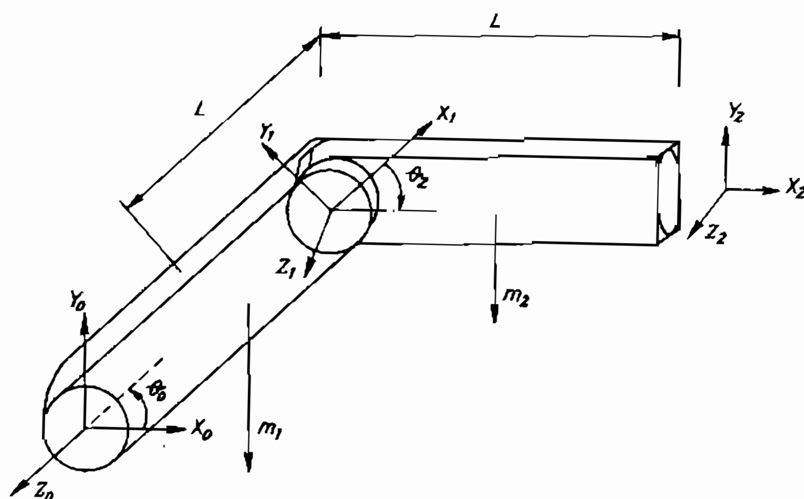
Từ phương trình động lực (8.30) có thể xây dựng phương trình trạng thái điều khiển hệ thống robot có các liên hệ phản hồi. Trên cơ sở đó có thể chọn lựa các quy luật điều khiển thường gặp sao cho giảm thiểu các ảnh hưởng phi tuyến tác động lên nhau của các nguồn động lực trong các khớp động.

8.7. ĐỘNG LỰC HỌC CỦA CƠ CẤU TAY MÁY 2 KHÂU.

Trong phần này dẫn ra ví dụ minh hoạ việc xây dựng mô hình động lực học của cơ cấu tay máy 2 khâu toàn khớp quay (hình 8.1).

Như đã chỉ trên hình 8.1 các trục Z_i đều trùng phương với các trục quay khớp động. Khối lượng của các khâu tương ứng là m_1, m_2; Bộ thông số DH của tay máy ghi trong bảng sau:

Khâu	θ_i	α_i	a_i	d_i	Khớp
1	θ_i^*	0	l	0	R
2	θ_i^*	0	l	0	R



Hình 8.1. *Cơ cấu tay máy 2 khâu*

Các ma trận ${}^{i-1}A_i$ (i = 1, 2) sẽ là:

$$
{}^0A_1 = \begin{bmatrix} C_1 & S_1 & 0 & lC_1 \\ S_1 & C_1 & 0 & lS_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
\qquad
{}^1A_2 = \begin{bmatrix} C_2 & -S_2 & 0 & lC_2 \\ S_2 & C_2 & 0 & lS_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
$$

$$ {}^0A_2 = {}^0A_1\, {}^0A_2 = \begin{bmatrix} C_{12} & -S_{12} & 0 & l(C_{12}+C_1) \\ S_{12} & C_{12} & 0 & l(S_{12}+S_1) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} $$

Vẫn như trước đây dùng các kí hiệu sau:

$C_i = \cos\theta_i$; $S_i = \sin\theta_i$; $C_{ij} = \cos(\theta_i + \theta_j)$; $S_{ij} = \sin(\theta_i + \theta_j)$.

Theo (8.15), ta có:

$$ \mathbf{U}_{11} = \frac{\partial^0 \mathbf{A}_1}{\partial\theta_1} = \mathrm{D}_1{}^0\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} C_1 & -S_1 & 0 & lC_1 \\ S_1 & C_1 & 0 & lS_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = $$

$$ = \begin{bmatrix} -S_1 & -C_1 & 0 & -lS_1 \\ C_1 & -S_1 & 0 & +lC_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} $$

Tương tự, đối với U_{21} và U_{22}:

$$ \mathbf{U}_{21} = \frac{\partial^0 \mathbf{A}_2}{\partial\theta_1} = \mathrm{D}_2{}^0\mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{12} & -S_{12} & 0 & l(C_{12}+C_1) \\ S_{12} & C_{12} & 0 & l(S_{12}+S_1) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = $$

$$ = \begin{bmatrix} -S_{12} & -C_{12} & 0 & -l(S_{12}+S_1) \\ C_1 & -S_{12} & 0 & +l(C_{12}+C_1) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} $$

$$U_{22}=\frac{\partial^0 A_2}{\partial\theta_2}={}^0A_1D_2{}^1A_2=\begin{bmatrix} C_1 & -S_1 & 0 & lC_1 \\ S_1 & C_1 & 0 & lS_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} C_2 & -S_2 & 0 & lC_2 \\ S_2 & C_2 & 0 & lS_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}=$$

$$=\begin{bmatrix} -S_{12} & -C_{12} & 0 & -lS_{12} \\ C_{12} & -S_{12} & 0 & lC_{12} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Theo (8.23) và giả thiết cả các thành phần mômen ly tâm quán tính đều bằng 0, ta có:

$$J_1=\begin{bmatrix} 1/3m_1l^2 & 0 & 0 & -1/2m_1l \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1/2m_1l & 0 & 0 & m_1 \end{bmatrix},\quad J_2=\begin{bmatrix} 1/3m_2l^2 & 0 & 0 & -1/2m_2l \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1/2m_2l & 0 & 0 & m_2 \end{bmatrix}.$$

Trên cơ sở (8.35), ta có:

$$D_{11}=T_2(U_{11}J_1U_{11}^T)+T_2(U_{21}J_2U_{21}^T)=$$

$$=T_2\left\{\begin{bmatrix} -S_1 & -C_1 & 0 & -lS_1 \\ C_1 & -S_1 & 0 & lC_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 1/3m_1l^2 & 0 & 0 & -1/2m_1l \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1/2m_1l & 0 & 0 & m_1 \end{bmatrix}U_{11}^T\right\}+$$

$$+T_2\left\{\begin{bmatrix} -S_{12} & -C_{12} & 0 & -l(S_{12}+C_1) \\ C_{12} & -S_{12} & 0 & l(C_{12}+C_1) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}\times\right.$$

$$\left.\times\begin{bmatrix} 1/3m_2l^2 & 0 & 0 & -1/2m_2l \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1/2m_2l & 0 & 0 & m_2 \end{bmatrix}U_{21}^T\right\}=1/3m_1l^2+4/3m_2l^2+m_2C_2l^2$$

$$D_{12} = D_{21} = Tr(\mathbf{U}_{22}\mathbf{J}_2\mathbf{U}_{21}^T) =$$

$$= Tr\left\{\begin{bmatrix} -S_{12} & -C_{12} & 0 & -lS_{12} \\ C_{12} & -S_{12} & 0 & lC_{12} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 1/3m_2l^2 & 0 & 0 & -1/2m_2l \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1/2m_2l & 0 & 0 & m_2 \end{bmatrix}\mathbf{U}_{21}^T\right\}$$

$$= m_2l^2(-1/6 + 1/2 + 1/2C_2) = 1/3m_2l^2 + 1/2m_2l^2$$

$$D_{22} = Tr(\mathbf{U}_{22}\mathbf{J}_2\mathbf{U}_{22}^T) =$$

$$= Tr\left\{\begin{bmatrix} -S_{12} & -C_{12} & 0 & -lS_{12} \\ C_{12} & -S_{12} & 0 & lC_{12} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 1/3m_2l^2 & 0 & 0 & -1/2m_2l \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1/2m_2l & 0 & 0 & m_2 \end{bmatrix}\mathbf{U}_{22}^T\right\} =$$

$$= 1/3m_2l^2S_{12}^2 + 1/3m_2l^2C_{12}^2 = 1/3m_2l^2.$$

Tính các số hạng trong biểu thức (8.36) đối với i = 1, ta có:

$$h_1 = \sum_{k=1}^{2}\sum_{m=1}^{2} h_{1km}\dot{\theta}_k\dot{\theta}_m = h_{111}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + h_{121}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + h_{122}\dot{\theta}_2^2 + h_{122}\dot{\theta}_2^2$$

và theo (8.37) tính các hệ số h_{ikm}, rồi thay vào phương trình trên, ta được:

$$h_1 = -1/2m_2S_2l^2\dot{\theta}_2^2 - m_2S_2l^2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2.$$

Tương tự đối với i = 2

$$h_2 = \sum_{k=1}^{2}\sum_{m=1}^{2} h_{2km}\dot{\theta}_k\dot{\theta}_m = h_{211}\dot{\theta}_1^2 + h_{212}\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + h_{221}\dot{\theta}_2\dot{\theta}_1 + h_{222}\dot{\theta}_2^2 =$$

$$= 1/2m_2S_2l^2\dot{\theta}_1^2.$$

Như vậy:

$$h(\theta,\dot{\theta}) = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}m_2S_2l^2\dot{\theta}_2^2 - m_2S_2l^2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 \\ \frac{1}{2}m_2S_2l^2\dot{\theta}_1^2 \end{bmatrix}.$$

Trên cơ sở (8.38), ta có:

$$c_1 = -(m_1 \mathbf{g} \mathbf{U}_{11}^1 \bar{\mathbf{r}}_1 + m_2 \mathbf{g} \mathbf{U}_{21}^2 \bar{\mathbf{r}}_2) =$$

$$= -m(0,-g,0,0)\begin{bmatrix} -S_1 & -C_1 & 0 & -lS_1 \\ C_1 & -S_1 & 0 & lC_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} -1/2 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} -$$

$$-m_2(0,-g,0,0)\begin{bmatrix} -S_{12} & -C_{12} & 0 & -l(S_{12}+S_1) \\ C_{12} & -S_{12} & 0 & l(C_{12}+C_1) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} -1/2 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} =$$

$$= 1/2 m_1 glC_1 + 1/2 m_2 glC_{12} + m_2 glC_1;$$

$$c_2 = -m_2 \mathbf{g} \mathbf{U}_{21}^2 \bar{\mathbf{r}}_2 =$$

$$= -m_2(0,-g,0,0)\begin{bmatrix} -S_{12} & -C_{12} & 0 & -lS_{12} \\ C_{12} & -S_{12} & 0 & lC_{12} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} -1/2 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} =$$

$$= -m_2(1/2 glC_{12} - glC_{12}).$$

Vậy vectơ lực trọng trường sẽ là:

$$c(\theta) = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} m_1 glC_1 + \frac{1}{2} m_2 glC_{12} + m_2 glC_1 \\ \frac{1}{2} m_2 glC_{12} \end{bmatrix}.$$

Cuối cùng ta có phương trình động lực học của cơ cấu tay máy 2 khâu ở dạng sau:

$$F_M(t) = D(\theta)(\ddot{\theta})(t) + h(\theta, \dot{\theta}) + c(\theta)$$

$$\begin{bmatrix} F_{M1} \\ F_{M2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/3 m_1 l^2 + 4/3 m_2 l^2 + m_2 C_2 l^2 & 1/3 m_2 l^2 + 1/2 m_2 l^2 C_2 \\ 1/3 m_2 l^2 + 1/2 m_2 l^2 C_2 & 1/3 m_2 l^2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} +$$

$$+ \begin{bmatrix} -1/2 m_2 S_2 l^2 \dot{\theta}_2^2 - m_2 S_2 l^2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \\ 1/2 m_2 S_2 l^2 \dot{\theta}_1^2 \end{bmatrix} +$$

$$+ \begin{bmatrix} 1/2 m_2 glC_1 - 1/2 m_2 glC_{12} + m_2 glC_1 \\ 1/2 m_2 glC_{12} \end{bmatrix}.$$

CHƯƠNG IX

ĐIỀU KHIỂN ROBOT

9.1. KHÁI NIỆM CHUNG VỀ HỆ ĐIỀU KHIỂN TỰ ĐỘNG

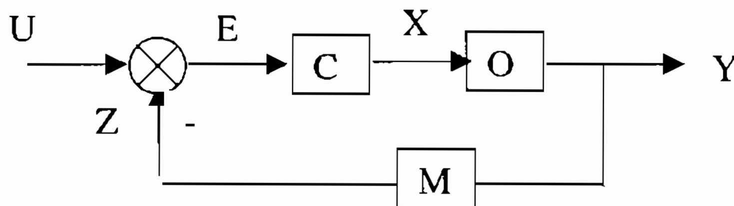
Hệ thống điều khiển tự động là hệ thống được xây dựng từ 3 bộ phận chủ yếu sau:

- Thiết bị điều khiển C (controller).

- Đối tượng điều khiển O (object).

- Thiết bị đo lường M (measuring device).

Đó là một hệ thống có phản hồi (feedback) hay có liên hệ ngược. Sơ đồ khối đơn giản nhất về hệ thống điều khiển tự động cho trên hình 9.1.



Hình 9.1. *Sơ đồ đơn giản hệ thống điều khiển tự động*

Các tín hiệu tác động trong hệ thống:

U - tín hiệu vào (input).

Y - tín hiệu ra (output).

X - tín hiệu điều khiển tác động lên đối tượng O.

E - sai lệch điều khiển.

Z - tín hiệu phản hồi (phản hồi âm ký hiệu bằng dấu (-) khi Z ngược dấu với tín hiệu U).

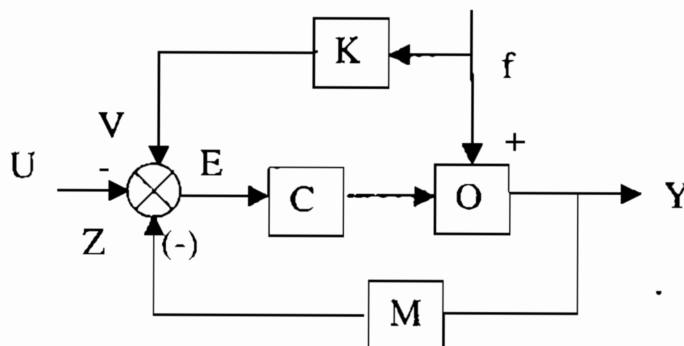
Thông thường có 3 nguyên tắc điều khiển cơ bản:

- Nguyên tắc điều khiển theo độ sai lệch.

- Nguyên tắc điều khiển theo phương pháp bù nhiễu.

- Nguyên tắc điều khiển hỗn hợp theo độ sai lệch và bù nhiễu.

Trên hình 9.2 vẽ sơ đồ hệ thống điều khiển theo nguyên tắc hỗn hợp. Tín hiệu Y(t) là tín hiệu ra, f(t) là nhiễu tác động vào đối tượng điều khiển.



Hình 9.2. *Sơ đồ hệ thống điều khiển hỗn hợp*

Nhiễu f(t) tác động lên đối tượng điều khiển, ví dụ, theo chiều hướng làm tăng tín hiệu ra Y(t). Trong hệ có đưa vào một thiết bị bù K có tác dụng ngược dấu với f, nghĩa là V tác dụng bù về phía trước thiết bị điều khiển C để làm tín hiệu E giảm bớt. Nếu f tác dụng lên đối tượng điều khiển O để làm giảm tín hiệu ra Y(t) thì thiết bị bù K lại tạo ra tín hiệu bù V làm tăng E để làm tăng Y.

Hệ thống điều khiển theo nguyên tắc hỗn hợp được dùng rộng rãi trong thực tế.

Ngoài các nguyên tắc điều khiển cơ bản nói trên người ta còn ứng dụng các nguyên tắc khác như:

- Nguyên tắc điều khiển theo chương trình.

- Nguyên tắc điều khiển thích nghi.

Ngày nay do sự phát triển nhanh chóng của kỹ thuật vi xử lý và vi tính người ta đã tổng hợp ra các hệ điều khiển rất phức tạp, trong đó thiết bị điều khiển (controller) chính là một máy vi tính có thêm các thiết bị ghép phôi A/D (Analogue – Digital) và D/A (Digital – Analogue). Các thuật toán điều khiển được tính toán theo các phương pháp tối ưu và thích nghi. Đồng thời trong những năm gần đây đã xuất hiện nhiều công cụ phần mềm làm xúc tiến mạnh mẽ việc nghiên cứu phát triển các hệ thống điều khiển tự động. Trong đó cần kể đến MATLAB, đó là một công cụ phần mềm của MathWorks. Matlab được sử dụng trong nhiều lĩnh vực giảng dạy, nghiên cứu, thiết kế và triển khai các hệ thống điều khiển, từ hệ

thống điều khiển đơn giản đến các hệ thống điều khiển tổng hợp phức tạp. Matlab còn có các bộ chương trình chuyên dụng (gọi là tools box) phong phú, trong đó có một số chương trình chuyên dụng cho điều khiển tự động.

Có nhiều cách phân loại các hệ thống điều khiển tự động. Thường có các hệ thống điều khiển sau:

1)Hệ thống tuyến tính.

2) Hệ thống phi tuyến tính.

3) Hệ thống liên tục: khi các tín hiệu tác động trong hệ là hàm liên tục theo thời gian.

4) Hệ thống rời rạc: trong đó chỉ cần có một tín hiệu là hàm rời rạc theo thời gian.

5) Hệ thống tiền định là hệ thống trong đó tất cả các tín hiệu truyền là hàm theo thời gian xác định (không có tín hiệu ngẫu nhiên).

6) Hệ thống ngẫu nhiên là hệ thống trong đó chỉ cần có 1 tín hiệu là hàm ngẫu nhiên.

7) Hệ thống tối ưu là hệ thống điều khiển trong đó thiết bị điều khiển có chức năng tổng hợp được một tín hiệu điều khiển U(t) tác động lên đối tượng điều khiển để đạt một trạng thái tối ưu theo một chỉ tiêu nào đó.

8) Hệ thống thích nghi hay còn gọi là hệ thống tự chỉnh là hệ thống có khả năng một cách tự động thích ứng với những biến đổi của điều kiện môi trường và đặc tính của đối tượng điều khiển bằng cách thay đổi tham số và cấu trúc sơ đồ của thiết bị điều khiển.

Các hệ thống được phân loại trên đây có thể lại có nhiều mối liên quan với nhau. Ví dụ, trong hệ ngẫu nhiên có thể là tuyến tính hoặc phi tuyến; trong hệ tuyến tính lại có thể là hệ liên tục hoặc rời rạc v.v... Do vậy có thể nói việc phân loại hệ thống điều khiển tự động hoàn toàn phụ thuộc vào mục đích phân loại.

Trong kĩ thuật người máy người ta cũng phân hệ điều khiển ra:

- Điều khiển chương trình: việc điều khiển được thực hiện theo một chương trình định sẵn.

- Điều khiển thích nghi: việc điều khiển tuỳ thuộc vào thông tin nhận biết được trong quá trình làm việc về hiện trạng của môi trường thao tác và của bản thân người máy.

Hệ điều khiển thích nghi khi được phát triển ở mức độ cao, thực hiện được một số chức năng của trí óc con người, thì có thể gọi là người máy có hệ điều khiển tinh khôn.

Tuỳ theo khả năng thực hiện các chuyển động của người máy mà chia thành các thiết bị điều khiển sau đây:

- Điều khiển theo chu tuyến: chuyển động được thực hiện theo một đường liên tục.

- Điều khiển theo vị trí: chuyển động được đảm bảo qua một số vị trí nhất định.

- Điều khiển theo chu kỳ: chuyển động được xác định bằng các vị trí đầu và cuối hành trình của mỗi bậc tự do.

9.2. PHÉP BIẾN ĐỔI LAPLACE.

Để dễ hình dung phép biến đổi Laplace so sánh nó với phép biến đổi Logarit quen biết. Nếu phép biến đổi Logarit đã làm đơn giản hoá nhiều phép tính đại số (ví dụ, phép luỹ thừa bậc lẻ v.v...) thì phép biến đổi Laplace cũng có thể làm đơn giản hoá các cách giải phương trình vi phân. Phép biến đổi Laplace là công cụ, là cơ sở của một phương pháp giải phương trình vi phân tuyến tính hệ số cố định để xét các đặc tính ổn định và quá độ. Phép biến đổi Laplace chuyển phương trình vi phân tuyến tính thành phương trình đại số. Sau đó, các nghiệm của phương trình đại số này sẽ được biến đổi ngược để cho các nghiệm của phương trình vi phân đã cho.

Phương trình chứa các đạo hàm theo thời gian t, được biến đổi thành phương trình đại số, trong đó xuất hiện biến số mới, biến số Laplace s. Biến số s là biến số độc lập thay cho thời gian t, tức là đã chuyển từ lĩnh vực thời gian sang lĩnh vực Laplace. Biến số s là biến số phức ($s = \sigma + j\omega$ với σ và ω là số thực, $j = \sqrt{-1}$).

Như vậy phép biến đổi Laplace dựa trên cơ sở thay thế các hàm biến thực (thường là thời gian) bằng một số quan hệ phụ thuộc tần số. Phương pháp này thường dùng làm cơ sở phân tích và thiết kế các hệ thống điều khiển tự động.

Biến đổi Laplace thuận là kết quả của một thuật toán chuyển đổi đối với hàm thời gian f(t) để cho ta hàm F(s) với biến số phức s.

Gọi F(s) là biến đổi Laplace của f(t) khi:

$$F(s) = L[f(t)] = \lim_{\substack{T\to\infty \\ \varepsilon\to 0}} \int_{\varepsilon}^{T} f(t)e^{-st}dt = \int_{0}^{\infty} f(t)e^{-st}dt \qquad (9.1)$$

Với $0 < \varepsilon < T$

Hàm f(t) phản là hàm thực và liên tục suốt thời gian khảo sát từ O^+ đến $+\infty$.

Ví dụ: hàm e^{-t} là hàm có thể biến đổi Laplace được vì.:

$$\int_{0^+}^{\infty} \left| e^{-t} \right| e^{-\sigma_0 t}dt = \int_{0^+}^{\infty} e^{-(1+\sigma_0)t}dt =$$

$$= \frac{1}{-(1-\sigma_0)} e^{-(1+\sigma_0)t}\Big|_{0^+}^{\infty} = \frac{1}{1+\sigma_0} < +\infty$$

Nếu $1 + \sigma > 0$ hoặc $\sigma_0 > -1$

Biến đổi Laplace của hàm e^{-t} là:

$$L[e^{-t}] = \int_{0^+}^{\infty} e^{-t}e^{-st}dt = \frac{-1}{s+1}e^{-(s+1)t}\Big|_{0^+}^{\infty} = \frac{1}{s+1}$$

9.2.1. Các cặp biến đổi Laplace (thuận nghịch) thường gặp

TT	f(t)	F(s)
1	Hàm xung đơn vị	1
2	Hàm bậc thang đơn vị	$\frac{1}{s}$
3	t	$\frac{1}{s^2}$

TT	f(t)	F(s)
4	t^n	$\frac{n!}{s^{n+1}}$
5	e^{-at}	$\frac{1}{s+a}$
6	$\frac{t^{n-1}.e^{-at}}{(n-1)!}$ n- số nguyên dương	$\frac{1}{(s+a)^n}$
7	$(1 - e^{-at})$	$\frac{1}{s(s+a)}$
8	$\frac{1}{a^2}(at - 1 + e - at)$	$\frac{1}{s^2(s+a)}$
9	$\frac{1}{b-a}(e^{-at} - e^{-bt})$	$\frac{1}{(s+a)(s+b)}$
10	$\frac{1}{ab}[1 + 1/a, b(b, e^{-at} - a, e^{-bt})]$	$\frac{1}{s(s+a)(s+b)}$
11	$\frac{1}{b-a}(be^{-at} - ae^{-bt})$	$\frac{S}{(s+a)(s+b)}$
12	$\sin \omega t$	$\frac{\omega}{s^2+\omega^2}$
13	$\cos \omega t$	$\frac{S}{s^2+\omega^2}$
14	$e^{-at}\sin \omega t$	$\frac{\omega t}{(s+a)^2+\omega^2}$
15	$e^{-at}\cos \omega t$	$\frac{s+a}{(s+a)^2+\omega^2}$

9.2.2.Các tính chất của phép biến đổi Laplace:

1. Tính chất tuyến tính:

$$L[a\, f(t)] = a.\, F(s) \quad (9.2)$$

$$L^{-1}[b\, F(s)] = b.\, f(t) \quad (9.3)$$

Trong đó L^{-1} - phép biến đổi Laplace nghịch.

2. Tính chất xếp chồng:

$$L[f_1(t) \pm f_2(t)] = F_1(s) \pm F_2(s) \quad (9.4)$$

$$L^{-1}[F_1(s) \pm F_2(s) = f_1(t) \pm f_2(t) \quad (9.5)$$

Kết hợp cả 2 tính chất trên (1. và 2.) ta có:

$$L[a_1f_1(t) \pm a_2f_2(t)] = a_1F_1(s) \pm a_2F_2(s) \quad (9.6)$$

$$L^{-1}[b_1F_1(s) \pm b_2F_2(s)] = b_1f_1(t) \pm b_2f_2(t) \quad (9.7)$$

3. Vi phân:

- Đạo hàm cấp 1

$$L\left[\frac{df(t)}{dt}\right] = sF(s) - f(0^+) \quad (9.8)$$

Giá trị (0^+) là giá trị f(t) tại thời gian đầu.

- Đạo hàm cấp 2

$$L\left[\frac{d^2f(t)}{dt^2}\right] = s^2F(s) - sF(0^+) - \frac{df(0^+)}{dt} \quad (9.9)$$

$\dfrac{df(0^+)}{dt}$ là giá trị của đạo hàm cấp 1 tại thời điểm đầu.

4. Tích phân:

$$L\left[\int_0^T f(t)dt\right] = \frac{F(s)}{s} + \frac{\int_0^T f(0^+)dt}{s} \quad (9.10)$$

9.3. HÀM TRUYỀN VÀ SƠ ĐỒ CẤU TRÚC HỆ ĐIỀU KHIỂN

9.3.1. Định nghĩa.

Hàm truyền của hệ thống là tỷ số giữa tín hiệu ra với tín hiệu vào của hệ thống đó biểu diễn theo biến số Laplace khi các điều kiện đầu bằng không.

Hàm truyền được ký hiệu là W(s)

$$W(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} \qquad (9.11)$$

với Y(s) - ảnh Laplace của tín hiệu ra.

X(s) - ảnh Laplace của tín hiệu vào.

s - biến số Laplace ($s = \sigma + j\omega$, với σ và ω là các số thực, $j = \sqrt{-1}$

Nếu x(t); y(t) là tín hiệu vào và tín hiệu ra của hệ thống trong lĩnh vực thời gian t, thì để xác định hàm truyền W(s) cần tìm ảnh của x(t); y(t) trong lĩnh vực Laplace bằng cách dùng phép biến đổi Laplace.

Để xác định hàm truyền của một hệ thống nào đó người ta thường xuất phát từ phương trình vi phân mô tả hệ thống đó, rồi dùng phép biến đổi Laplace để tìm hàm truyền.

Trong trường hợp tổng quát hệ thống được mô tả bằng phương trình vi phân sau:

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \ldots + a_0 y = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \ldots + b_0 x \qquad (9.12)$$

hoặc

$$\sum_{i=0}^{n} a_i \frac{d^i y}{dt^i} = \sum_{i=0}^{m} b_i \frac{d^i x}{dt^i} \qquad (9.13)$$

Dùng phép biến đổi Laplace của đạo hàm cấp n.

$$L\left[\frac{d^n f(t)}{dt^n}\right] = S^{n-1}F(s) - S^{n-1}f(0^+) - \cdots - \frac{d^{n-1}f(0^+)}{dt^{n-1}} \qquad (9.14)$$

Sau khi biến đổi Laplace phương trình vi phân trên khi các điều kiện đầu bằng không, ta có:

$$W(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{\sum_{i=0}^{m} b_i s^i}{\sum_{i=0}^{n} a_i s^i}, \qquad m \le n \qquad (9.15)$$

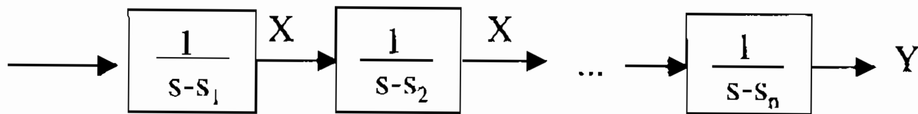
tức là:

$$W(s) = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \cdots + b_o}{a_n s^n + b_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_0} \qquad (9.16)$$

Khi W(s) có dạng tích số các phân thức bậc nhất s ở mẫu số:

$$W(s) = \prod_{i=1}^{n} \frac{1}{s - s_i} = \frac{Y(s)}{X(s)} \qquad (9.17)$$

thì sơ đồ trạng thái biểu diễn hàm truyền (9.17) vẽ trên hình 9.3



Hình 9.3. *Sơ đồ trạng thái ứng với biểu thức (9.17)*

Khi hàm truyền có thể khai triển thành tổng các phân thức đơn giản:

$$W(s) = \sum_{i=1}^{n} \frac{C_i}{s - s_i} = \frac{Y(s)}{X(s)} \qquad (9.18)$$

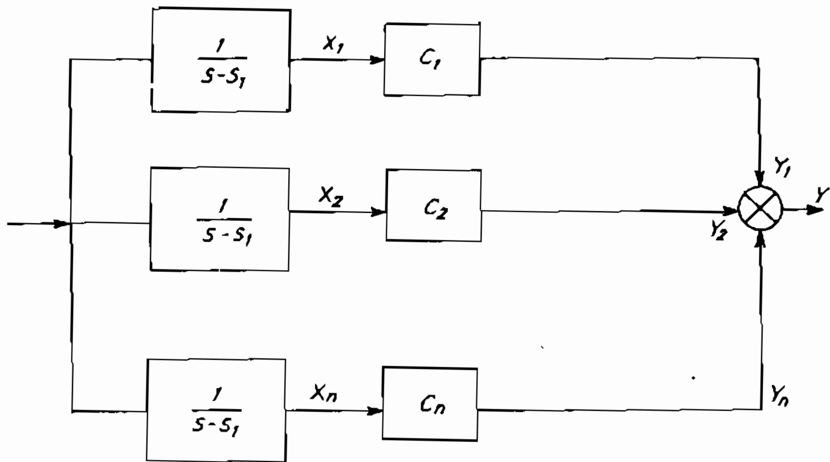
Hay:

$$\sum_{i=1}^{n} \left[C_i \frac{X(s)}{s - s_i} \right] = Y(s) \qquad (9.19)$$

Đặt: $$X_i(s) = \frac{X(s)}{s - s_i} \qquad (9.20)$$

thì: $$Y(s) = \sum_{i=1}^{n} C_i X_i(s) \qquad (9.21)$$

Theo đó có sơ đồ trạng thái trên hình 8.4. Trên đó X_i (i = 1, 2 ...n) là các biến trạng thái, còn Y_i (i = 1, 2, ... n) là các biến ra.

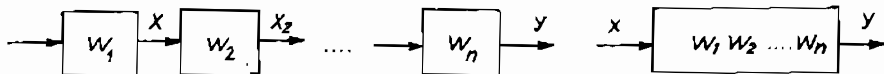


Hình 9.4. *Sơ đồ trạng thái ứng với biểu thức (9.21)*

9.3.2 Phương pháp biến đổi sơ đồ cấu trúc

1) Nối tiếp các khối:

Có n khối nối tiếp nhau tương ứng với các hàm truyền W_1, W_2 ... W_n thì hàm truyền tương đương sẽ bằng tích của n hàm truyền thành phần.



Hình 9.5. *Nối tiếp các khối*

Thật vậy, từ hình 9.5 ta có:

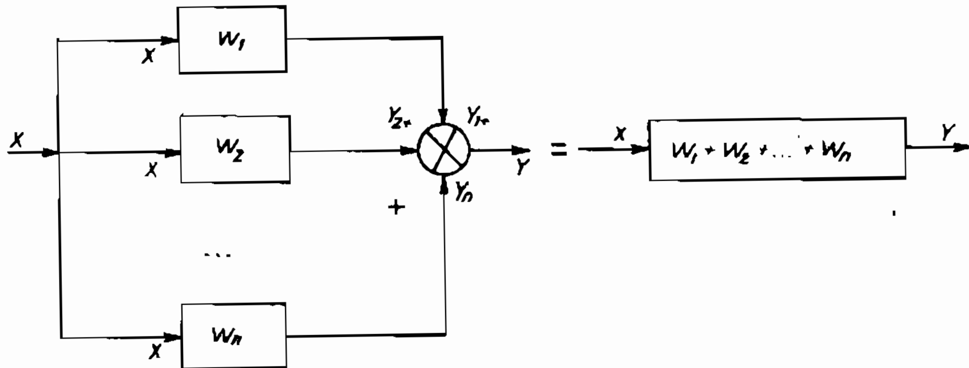
$$\left.\begin{aligned} W_1 &= \frac{X_1}{X} \\ W_2 &= \frac{X_2}{X_1} \\ &\vdots \\ W_n &= \frac{Y}{X_{n-1}} \end{aligned}\right\} \qquad W = \frac{Y}{X}$$

Rõ ràng ta có ngay:

$$W_1 W_2 \ldots W_n = \prod_{i=1}^{n} W_i = W \qquad (9.22)$$

2) Nối song song các khối.

Có n khối song song thì hàm truyền tương đương sẽ bằng tổng các hàm truyền thành phần.



Hình 9.6. *Nối song song*

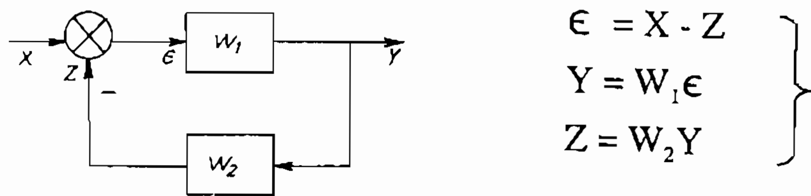
Thật vậy, từ hình 9.6 ta có:

$$\left.\begin{array}{l} Y_1 = W_1 X \\ Y_2 = W_2 X \\ \ldots\ldots\ldots \\ Y_n = W_n X \end{array}\right\} \quad \begin{array}{l} \text{và } Y = Y_1 + Y_2 + \ldots + Y_n \\ Y_1 + Y_2 + \ldots + Y_n = (W_1 + W_2 + \ldots + W_n) \end{array}$$

vậy: $$W = \frac{Y}{X} = W_1 + W_2 + \ldots + W_n = \sum_{i=1}^{n} W_i \qquad (9.23)$$

3) Hai khối nối ngược chiều (phản hồi)

Xét hệ thống có liên hệ phản hồi, trên hình 9.7 ghi dấu trừ (-)



Hình 9.7. *Hai khối nối ngược chiều*

Giải ra ta có:

$$W = \frac{Y}{X} = \frac{W_1}{1 + W_1W_2} \tag{9.24}$$

Nếu hệ thống có phản hồi dương thì

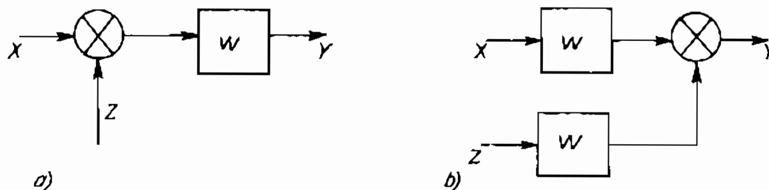
$$\epsilon = X + Z$$

và:

$$W = \frac{Y}{X} = \frac{W_1}{1 - W_1W_2} \tag{9.25}$$

4) Chuyển tín hiệu vào từ trước ra sau một khối

Điều kiện biến đổi cấu trúc là tín hiệu truyền không biến đổi. Trên hình 9.8 phải có X, Z và Y không đổi.



Hình 9.8. *Chuyển tín hiệu vào từ trước ra sau*

Từ hình 8.8a ta có:

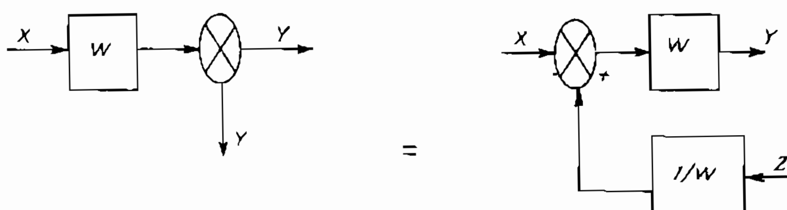
$$Y = (X + Z)\,W = WX + WZ$$

Từ hình 8.8b ta có:

$$Y = Y_1 + Y_2 = WX + WZ$$

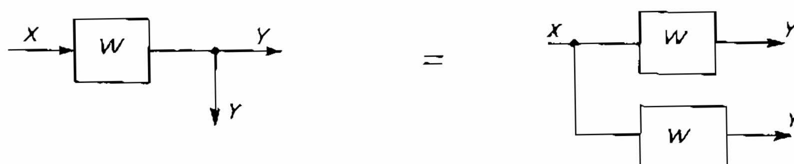
Rõ ràng tín hiệu Z chuyển từ trước ra sau một khối, tín hiệu đó phải đi qua một khối mới, đúng bằng khối đó.

5) Chuyển tín hiệu vào từ sau ra trước một khối.



Hình 9.9. *Chuyển tín hiệu vào từ sau ra trước*

6) Chuyển tín hiệu ra từ sau ra trước một khối



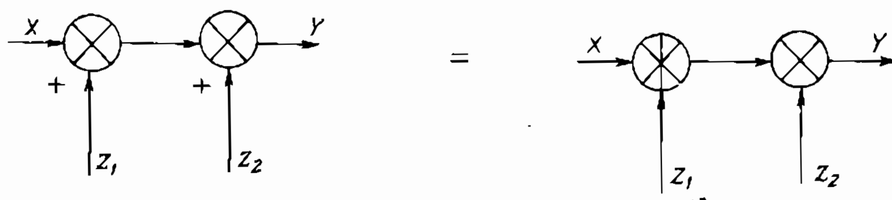
Hình 9.10. *Chuyển tín hiệu ra từ sau ra trước*

7) Chuyển tín hiệu ra từ trước ra sau một khối



Hình 9.11. *Chuyển tín hiệu ra từ trước ra sau*

8) Hoán vị 2 tín hiệu vào (hoặc 2 tín hiệu ra) với nhau thì sơ đồ không thay đổi



Hình 9.12. *Hoán vị 2 tín hiệu*

Ví dụ:

Xét hệ thống có sơ đồ cấu trúc như hình 9.13. Muốn đơn giản sơ đồ cấu trúc hình 9.13, phải dịch chuyển tín hiệu ra giữa 2 khối W_3 - W_4 ra trước khối W_3 (hình 9.14):

Hai tín hiệu ra từ A và B có thể hoán vị cho nhau khi đó mạch vòng W_2 - W_3 - W_6 có thể thay tương đương bằng W_{t1} (phản hồi dương):

$$W_{t1} = \frac{W_2}{1 - W_2 W_3 W_6} \tag{9.26}$$

Do đó ta có sơ đồ cấu trúc mới trên hình 8.15.

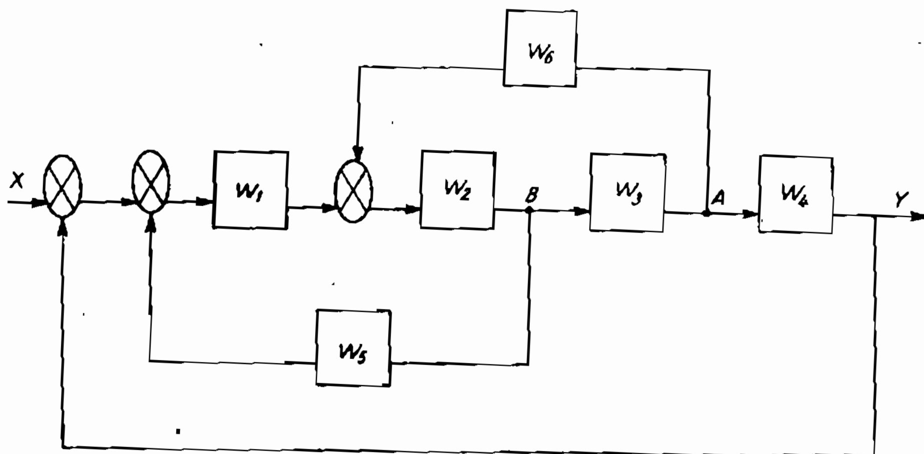
Từ sơ đồ hình 9.15 mạch vòng W_1 - W_{t1} - W_5 (phản hồi âm) có thể thay tương đương bằng W_{t2}:

$$W_{t2} = \frac{W_1 W_{t1}}{1 + W_1 W_{t1} W_5} \tag{9.27}$$

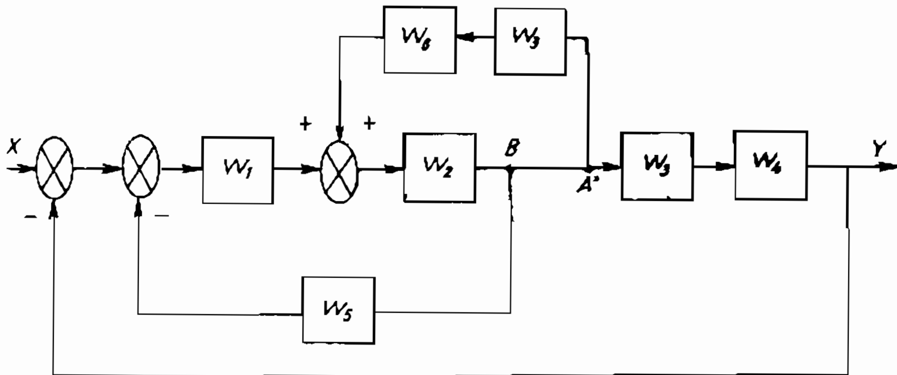
Do đó có sơ đồ cấu trúc mới trên hình 9.16.

Cuối cùng có thể tính được hàm truyền của cả hệ thống là:

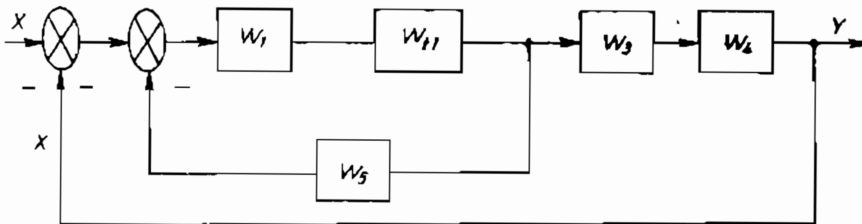
$$W = \frac{W_{t2} W_3 W_4}{1 + W_{t2} W_3 W_4} \tag{9.28}$$



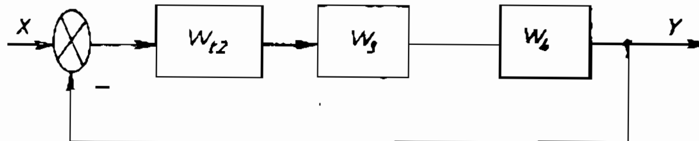
Hình 9.13. *Ví dụ sơ đồ cấu trúc*



Hình 9.14. *Chuyển tín hiệu ra ở A sang A*



Hình 9.15. *Thay W_2 - W_3 - W_6 tương dương bằng W_{t1}*



Hình 9.16. *Thay W_1 - W_{t1} - W_3 tương ứng bằng W_{t2}*

9.4. HÀM TRUYỀN TẦN SỐ VÀ ĐẶC TÍNH TẦN SỐ.

Trong lý thuyết điều khiển tự động người ta còn sử dụng rộng rãi hàm truyền tần số (hay là ham truyền phức). Hàm truyền tần số là tỷ số giữa tín hiệu ra và tín hiệu vào của hệ thống khi đầu vào biến đổi theo quy luật điều hoà với tần số thay đổi từ 0 đến ∞.

Nếu tín hiệu vào $x = x_m \sin \omega t$ (9.29)

Tín hiệu ra là $y = y_m \sin (\omega t + \varphi)$ (9.30)

Có thể biểu diễn bằng phức số:

- Đối với tín hiệu vào:

$$\left.\begin{aligned}
x(t) &= x_m \sin\omega t \rightarrow x_m e^{j\omega t}\\
\frac{dx}{dt} &= x_m \omega \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) \rightarrow j\omega . x_m . e^{j\omega t}\\
\frac{d^2x}{dt^2} &= x_m \omega^2 \sin(\omega t + 2\frac{\pi}{2} \rightarrow (j\omega)^2 x_m . e^{j\omega t}
\end{aligned}\right\} \quad (9.31)$$

- Đối với tín hiệu ra:

$$\left.\begin{aligned}
y(t) &= y_m \sin(\omega t + \varphi) \rightarrow y_m e^{j(\omega t + \varphi)}\\
\frac{dy}{dt} &= y_m \omega \sin(\omega t + \varphi + \frac{\pi}{2}) \rightarrow j\omega . y_m . e^{j(\omega t + \varphi)}\\
\frac{d^2y}{dt^2} &= y_m \omega^2 \sin(\omega t + \varphi + 2\frac{\pi}{2} \rightarrow (j\omega)^2 y_m . e^{j(\omega t + \varphi)}
\end{aligned}\right\} \quad (9.32)$$

- Nếu một hệ thống đơn giản được mô tả bởi phương trình vi phân bậc 2:

$$a_2 \frac{d^2y}{dt^2} + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_2 \frac{d^2x}{dt^2} + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x \quad (9.33)$$

thì khi thay vào phương trình vi phân này các biểu thức phức số (9.31), (9.32) tín hiệu vào và ra ở trên ta có:

$$\begin{aligned}
&[a_2 (j\omega)^2 + a_1 (j\omega) + a_0] y_m . e^{(j\omega t + \varphi)} = \\
&\qquad = [b_2 (j\omega)^2 + b_1 (j\omega) + b_0] x_m . e^{j\omega t}
\end{aligned} \quad (9.34)$$

Ký hiệu hàm truyền tần số là $W(j\omega)$:

$$W(j\omega) = \frac{y_m}{x_m} e^{j\varphi} \quad (9.35)$$

Vậy:

$$W(j\omega) = \frac{b_2(j\omega)^2 + b_1(j\omega) + b_0}{a_2(j\omega)^2 + a_1(j\omega) + a_0} \qquad (9.36)$$

Suy từ (9.16) theo phương trình vi phân (9.33) ta có hàm truyền:

$$W(s) = \frac{b_2s^2 + b_1s + b_0}{a_2s^2 + a_1s + a_0} \qquad (9.37)$$

So sánh (9.36) và (9.37) có nhận xét sau: *Hàm truyền tần số có thể được xác định từ hàm truyền trong lĩnh vực Laplace bằng cách thay biến số phức s bằng biến số ảo (jω).* Việc thay thế có vẻ rất hình thức này được giải thích rõ về mặt vật lý qua ví dụ ở trên.

Sử dụng hàm truyền tần số và phương pháp phân tích tần số cho phép chúng ta có thể đánh giá và điều chỉnh được các tính năng của hệ thống mà không cần giải phương trình vi phân.

- Nếu viết hàm truyền tần số dưới dạng biên độ pha:

$$W(j\omega) = A(\omega).e^{j\varphi(\omega)} \qquad (9.38)$$

trong đó A(ω) là biên độ của W(jω), còn φ (ω) là pha của W(jω) thì từ biểu thức 9.36, ta có:

$$A(\omega) = \frac{\sqrt{(b_0 - b_2\omega^2)^2 + (b_1\omega)^2}}{\sqrt{(a_0 - a_2\omega^2)^2 + (a_1\omega)^2}} \qquad (9.39)$$

$$\varphi(\omega) = \text{arctg}\frac{b_1\omega}{b_0 - b_2\omega^2} - \text{arctg}\frac{a_1\omega}{a_0 - a_2\omega^2} \qquad (9.40)$$

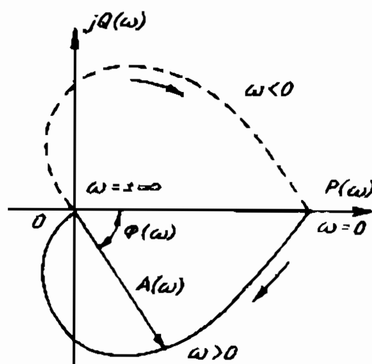
- Nếu viết W(jω) dưới dạng phần thực và ảo thì:

$$W(j\omega) = P(\omega + jQ(\omega) \qquad (9.41)$$

Trong đó: P(ω) là phần thực của W(jω).

Q(ω) là phần ảo của W(jω).

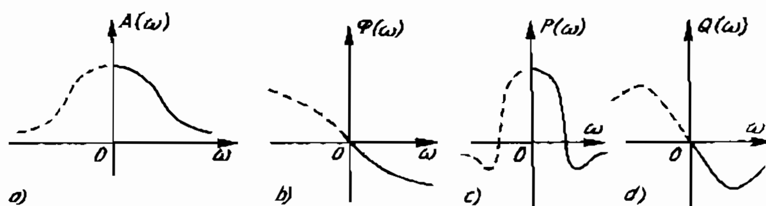
Hàm truyền tần số W(jω) được biểu diễn thành một đường cong trên mặt phẳng phức và gọi là đặc tính tần số biên độ pha (viết tắt là ĐTBP). ĐTBP gồm 2 nhánh đối xứng qua trục hoành. Thông thường người ta chỉ quan tâm nhánh ứng với ω > 0 (hình 9.17).



Hình 9.17. *Đặc tính tần số biên độ pha (ĐTBP)*

Trên hình 9.18a và 9.18b xây dựng đặc tính tần số biên độ – A(ω) và đặc tính tần số – pha (φ (ω). Trên hình 9.18c và 9.18d xây dựng đặc tính tần số – phần thực P(ω) và tần số – phần ảo Q(ω).

Vì A(ω) và P(ω) là hàm chẵn nên đường đặc tính đối xứng qua trục tung, còn φ(ω) và Q(ω) là hàm lẻ nên đường đặc tính đối xứng qua gốc toạ độ.



Hình 9.18. *Các đường đặc tính*

Nếu biết các đặc tính P(ω) và Q(ω) xác định A(ω) và φ(ω) theo các công thức sau:

$$A(\omega) = \sqrt{P^2(\omega) + Q^2(\omega)} \tag{9.42}$$

$$\varphi(\omega) = \text{arctg}\frac{Q(\omega)}{P(\omega)} \tag{9.43}$$

Đặc tính tần số biên độ pha thường được biểu diễn theo tỷ lệ xích logarit. Nếu lấy logarit 2 vế của (9.38) ta có:

$$\ln W(j\omega) = \ln A(\omega) + j\varphi(\omega) \tag{9.44}$$

Biểu thức: $L(\omega) = \ln A(\omega)$ (9.45)

được gọi là đặc tính tần số biên độ logarit (ĐTBL). Đặc tính tần số biên độ logarit thường được biểu diễn ở dạng:

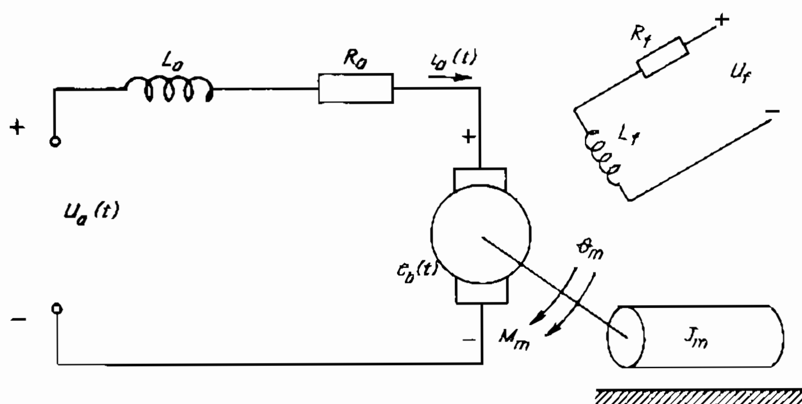
$$L(\omega) = 20\ln A(\omega) \quad (9.46)$$

Trục tung đặc L(ω) theo đơn vị decibel (viết tắt là dB), còn trục hoành thuận lợi nhất là theo lg(ω).

9.5. HÀM TRUYỀN CHUYỂN ĐỘNG MỖI KHỚP ĐỘNG

Trong phần này trình bày phương pháp xây dựng hàm truyền đối với trường hợp chuyển động 1 bậc tự do. Trong cơ cấu tay máy mỗi bậc tự do thường được điều khiển bằng một hệ truyền động riêng. Truyền động có thể là thuỷ lực, khí nén nhưng nhiều hơn cả là bằng động cơ điện một chiều.

Trên hình 9.19 là sơ đồ động cơ điện một chiều với tín hiệu vào là điện áp U_a đặt vào phần ứng, tín hiệu ra là góc quay θ_m của trục động cơ, kích từ cho động cơ là kích từ độc lập.



Hình 9.19. *Sơ đồ với động cơ điện một chiều*

Trục động cơ thường nối liền với hộp giảm tốc (hình 9.20) rồi tới trục phụ tải. Gọi n là tỷ số truyền, θ_L là góc quay của trục phụ tải, ta có:

$$\left.\begin{aligned}\theta_L(t) &= n\theta_m(t)\\ \dot{\theta}_L(t) &= n\dot{\theta}_m(t)\\ \ddot{\theta}_L(t) &= n\ddot{\theta}_m(t)\end{aligned}\right\} \qquad (9.47)$$

Mômen trên trục động cơ bằng tổng mômen cần để động cơ quay cộng với mômen phụ tải quy về trục động cơ.

$$M(t) = M_m(t) + M_L^*(t) \qquad (9.48)$$

Ký hiệu J_m - mômen quán tính của động cơ

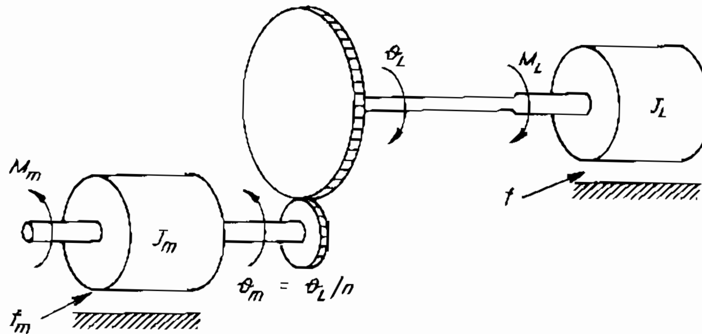
J_l - mômen quan tính phụ tải

ta có:

$$M_m(t) = J_m\ddot{\theta}_m(t) + f_m\dot{\theta}_m(t) \qquad (9.49)$$

$$M_L(t) = J_L\ddot{\theta}_L(t) + f_L\dot{\theta}_L(t) \qquad (9.50)$$

trong đó f_m và f_L là hệ số cản của động cơ và của phụ tải.



Hình 9.20. *Sơ đồ động cơ điện cùng phụ tải*

Theo định luật bảo toàn năng lượng, công do phụ tải sinh ra tính trên trục phụ tải là $M_l\ \theta_L$ phải bằng công quy về trục động cơ $M_L^*\theta_M$. Từ đó ta có:

$$M_L^*(t) = \frac{M_L(t)\theta_L(t)}{\theta_m(t)} = nM_L(t) \qquad (9.51)$$

Tính tới (9.47) và (9.50) ta có:

$$M_L^*(t) = n^2[J_L\ddot{\theta}_m(t) + f_L\dot{\theta}_m(t)] \quad (9.52)$$

Thay (9.49) và (9.52) vào (9.48) ta có:

$$M(t) = (J_m + n^2J_L)\ddot{\theta}_m(t) + (f_m + n^2f_L)\dot{\theta}_m(t)$$

$$M(t) = J\ddot{\theta}_m(t) + f\dot{\theta}_m(t) \quad (9.53)$$

với $J = J_m + n^2J_L$

$f = f_m + n^2 f_L$

Trong đó: J - mômen quán tính tổng hiệu dụng

F - hệ số tổng hiệu dụng.

Bởi vì mômen trên trục động cơ phụ thuộc tuyến tính với cường độ dòng điện phần ứng và không phụ thuộc vào góc quay và vận tốc góc, ta có:

$$M(t) = K_a i_a(t) \quad (9.54)$$

với i_a - cường độ dòng điện,

K_a - hệ số tỷ lệ mômen.

Đối với mạch điện phần ứng:

$$U_a(t) = R_a i_a(t) + L_a\frac{di_a(t)}{dt} + e_b(t) \quad (9.55)$$

với R_a, L_a - điện trở và điện cảm phần ứng

e_b - sức phản điện động của động cơ

$$e_b(t) = K_b\dot{\theta}_m(t) \quad (9.56)$$

K_b - hệ số tỷ lệ với sức phản điện động.

Dùng phép biến đổi Laplace, từ (9.55), ta có:

$$I_a(s) = \frac{U_a(s) - sK_b\theta_m(s)}{R_a + sL_a} \quad (9.57)$$

Từ (8.53) ta có:

$$M(s) = s^2J\theta_m(s) + sf\theta_m(s) \quad (9.58)$$

Và từ (9.54) ta có:

$$M(s) = K_a I_a(s) = K_a \left[\frac{U_a(s) - sK_b \theta_m(s)}{R_a + sL_a} \right] \qquad (9.59)$$

Trên cơ sở (9.58) và (9.59) ta có:

$$\frac{\theta_m(s)}{U_a(s)} = \frac{K_a}{s[s^2 JL_a + (L_a f + R_a J)s + R_a f + K_a K_b]} \qquad (9.60)$$

Đây là hàm truyền cần xác định, nó là tỷ số giữa tín hiệu ra (góc quay θ_m) và tín hiệu vào của hệ thống (điện áp U_a).

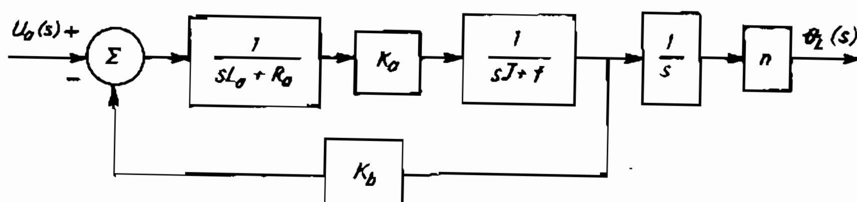
Biến đổi (9.60) dưới dạng sau:

$$\frac{\theta_m(s)}{U_a(s)} = \frac{K_a}{s[(sL_a + R_a)(sJ + f) + K_a K_b]} \qquad (9.61)$$

Bởi vì hệ thống gồm có cả động cơ và phụ tải nên tín hiệu ra là góc quay của trục phụ tải θ_L như trong công thức (9.47). Cuối cùng hàm truyền chuyển động 1 bậc tự do của tay máy là:

$$\frac{\theta_L(s)}{U_a(s)} = \frac{nK_a}{s[(sL_a + R_a)(sJ + f) + K_a K_b]} \qquad (9.62)$$

và sơ đồ khối tương ứng như trên hình 9.21:



Hình 9.21. *Hàm truyền chuyển động một bậc tự do*

Để đơn giản hoá có thể không xét đến ảnh hưởng của điện cảm phần ứng là L_a vì nó thường quá nhỏ so với các nhân tố ảnh hưởng cơ khí khác. Phương trình (9.62) còn lại như sau:

$$\frac{\theta_L(s)}{U_a(s)} = \frac{nK_a}{s(sR_a J + R_a f + K_a K_b)} \qquad (9.63)$$

9.6. ĐIỀU KHIỂN CHUYỂN ĐỘNG MỖI KHỚP ĐỘNG

Nhiệm vụ điều khiển lúc này là làm sao cho động cơ chuyển dịch khớp động đi một góc bằng góc quay đã tính toán để đảm bảo theo quỹ đạo đã chọn (xem chương VII). Việc điều khiển được thực hiện như sau: theo tín hiệu sai lệch giữa giá trị thực tế và giá trị tính toán của vị trí góc mà điều chỉnh điện áp $U_a(t)$ vào động cơ. Hay nói khác đi, để điều khiển theo quỹ đạo phải đặt điện áp vào động cơ tỷ lệ thuận với độ sai lệch góc quay của khớp động.

$$U_a(t) = \frac{K_p e(t)}{n} = \frac{K_p[\tilde{\theta}_L(t) - \theta_L(t)]}{n} \tag{9.64}$$

Với K_p - hệ số truyền tín hiệu phản hồi về vị trí

e(t) - độ sai lệch góc quay: $e(t) = \tilde{\theta}_L(t) - \theta_L(t)$

Giá trị góc quay tức thời $\tilde{\theta}_L(t)$ được đo báo bằng cảm biến (sensor) quang học hoặc chiết áp.

Biến đổi Laplace phương trình (9.64):

$$U_a(s) = \frac{K_p[\tilde{\theta}_L(s) - \theta_L(s)]}{n} = \frac{K_p E(s)}{n} \tag{9.65}$$

và thay (9.65) vào (9.63).

$$\frac{\theta_L(s)}{E(s)} = \frac{K_a K_p}{s(sR_a J + R_a f + K_a K_b)} = G(s), \tag{9.66}$$

Sau khi biến đổi đại số đơn giản ta có hàm truyền:

$$\frac{\theta_L(s)}{\tilde{\theta}_L(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)} = \frac{K_a K_p}{s^2 R_a J + s(R_a f + K_a K_b) + K_a K_p} =$$

$$= \frac{K_a K_p / R_a J}{s^2 + \frac{[R_a f + K_a K_b]}{R_a J} s + \frac{K_a K_p}{R_a J}} \tag{9.67}$$

Từ phương trình (9.67) hệ điều chỉnh tỷ lệ dịch chuyển mỗi khớp động là hệ bậc 2. Nếu các hệ số phương trình bậc 2 này là dương thì hệ sẽ ổn định. Để nâng cao đặc tính động lực học của hệ và để giảm sai số tĩnh có thể tăng hệ số K_p và xét tới đạo hàm của độ sai lệch dịch chuyển qua

hệ số K_v. Muốn thế thì điện áp điều khiển động cơ sẽ tỷ lệ thuận với độ sai lệch dịch chuyển và đạo hàm của nó.

$$U_a = \frac{K_p[\tilde{\theta}_L(t) - \theta_L(t)] + K_v[\dot{\tilde{\theta}}_L(t) - \dot{\theta}_L(t)]}{n} = \frac{K_p e(t) + K_v \dot{e}(t)}{n} \quad (9.68)$$

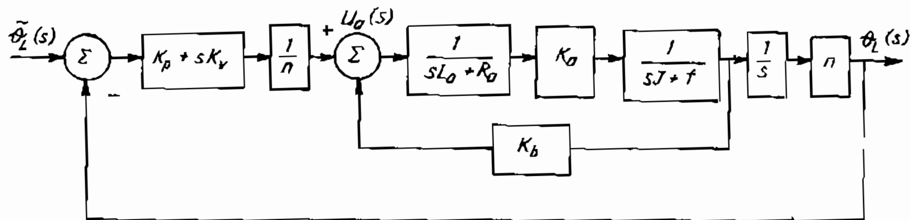
Như vậy, khi có liên hệ phản hồi hệ thống trở thành khép kín và sơ đồ hàm truyền biểu thị trên hình 9.22.

Sau khi biến đổi Laplace biểu thức (9.68) và thay U_a vào (9.66) ta có hàm truyền:

$$\frac{\theta_l(s)}{E(s)} = \frac{K_a(K_p + sK_v)}{s(sR_aJ + R_af + K_aK_b)} = \frac{K_aK_vs + K_aK_p}{s(sR_aJ + R_af + K_aK_b)} = G_v(s) \quad (9.69)$$

Từ đó có:

$$\frac{\theta_L(s)}{\tilde{\theta}_l(s)} = \frac{G_v(s)}{1 + G_v(s)} = \frac{K_aK_vs + K_aK_p}{s^2R_aJ + s(R_af + K_aK_b + K_aK_v) + K_aK_p} \quad (9.70)$$



Hình 9.22. *Sơ đồ điều khiển chuyển dịch 1 khớp động có liên hệ phản hồi.*

9.7. ĐÁNH GIÁ ĐẶC TÍNH ĐỘNG LỰC CỦA HỆ ĐIỀU KHIỂN

Trước hết cần nghiên cứu phạm vi thay đổi hệ số truyền phản hồi về vị trí và vận tốc (hệ số K_p và hệ số K_v). Như đã biết, phương trình đặc trưng của hệ bậc 2 có dạng chuẩn như sau:

$$s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2 = 0 \quad (9.71)$$

với ξ và ω_n - hệ số giảm chấn và tần số riêng của hệ dao động.

Đối chiếu giữa 2 phương trình (9.70) và (9.71) ta có:

$$\omega_n^2 = \frac{K_a K_p}{JR_a} \qquad (9.72)$$

$$2\xi\omega_n = \frac{R_a f + K_a K_b + K_a K_v}{JR_a} \qquad (9.73)$$

Để đảm bảo chế độ làm việc có giảm chấn cần thiết thì $\xi \geq 1$. Do vậy:

$$\xi = \frac{R_a f + K_a K_b + K_a K_v}{2\sqrt{K_a K_p JR_a}} \geq 1 \qquad (9.74)$$

Từ điều kiện (8.74):

$$K_v \geq \frac{2\sqrt{K_a K_p JR_a} - R_a f - K_a K_b}{K_t}. \qquad (9.75)$$

Để tránh dao động cộng hưởng, thường chọn:

$$\omega_n \leq 0{,}5\ \omega_r \qquad (9.76)$$

với ω_r - tần số cộng hưởng của hệ kết cấu.

Tần số cộng hưởng của hệ kết cấu chủ yếu phụ thuộc vào vật liệu chế tạo tay máy. Nếu gọi độ cứng vững của hệ khớp độnglà K_{cv} thì mômen gây nên $K_{cv}\theta_m(t)$ cân bằng với mômen quán tính của động cơ:

$$J\ddot{\theta}_m(t) + K_{cv}\theta_m(t) = 0 \qquad (9.77)$$

Phương trình đặc trưng của biểu thức (9.77) sau khi biến đổi Laplace sẽ là:

$$Js^2 + K_{cv} = 0 \qquad (9.78)$$

Giải phương trình trên tìm tần số cộng hưởng:

$$\omega_r = \left(\frac{K_{cv}}{J}\right)^{1/2} \qquad (9.79)$$

Nếu ω_0 là tần số cộng hưởng đo được ứng với mômen quán tính J_0 đã biết, thì đối với mômen quán tính J, tần số cộng hưởng tương ứng là:

$$\omega_r = \omega_0\left(\frac{J_0}{J}\right)^{1/2} \qquad (9.80)$$

Theo điều kiện (9.76) và từ (9.72) có:

$$0 < K_p \le \frac{\omega_r^2 J R_a}{4K_a} \tag{9.81}$$

Tính thêm biểu thức (9.80) có:

$$0 < K_p \le \frac{\omega_0^2 J_0 R_a}{4K_a} \tag{9.82}$$

Biết K_p, thay vào (9.75) nhận được:

$$K_v \ge \frac{R_a \omega_0 \sqrt{J_0 J} - R_a f - K_a K_b}{K_a} \tag{9.83}$$

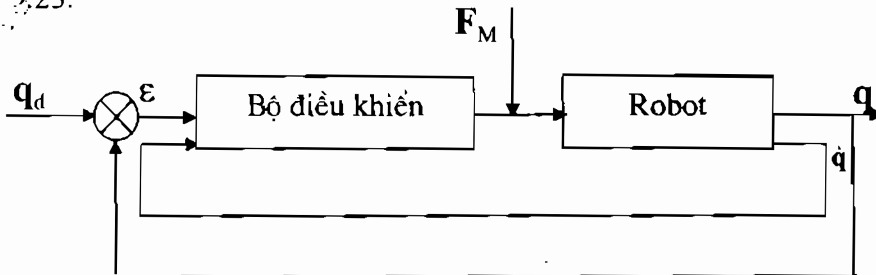
9.8. ĐIỀU KHIỂN CHUYỂN ĐỘNG ROBOT NHIỀU BẬC TỰ DO.

Nhiệm vụ quan trọng đầu tiên của việc điều khiển robot là đảm bảo sao cho điểm tác động cuối E (End - effector) của cơ cấu tay máy phải dịch chuyển bám theo một quỹ đạo đặt trước. Không những thế, hệ toạ độ x_e, y_e, z_e gắn liền tại điểm E đó phải duy trì theo một định hướng nào đó. Phương pháp giải bài toán này đã trình bày ở ***chương V***. Đó là nội dung cơ bản để xây dựng chương trình điều khiển vị trí cho robot.

Tuy nhiên khi giải bài toán này chưa xét tới các điều kiện thực tế khi làm việc, như là có sự tác động của mômen lực, của môi trường làm việc v.v...

Các yếu tố này sẽ lần lượt được tính tới và phương pháp điều khiển cũng trở nên đa dạng và phong phú hơn, tuỳ theo yêu cầu nâng cao chất lượng điều khiển.

Như đã biết, các khớp động của robot đều có nguồn động lực riêng, nên điều khiển robot là điều khiển các nguồn động lực độc lập đó. Sơ đồ khối tổng quát của hệ thống điều khiển robot được mô tả trên hình 9.23.



Hình 9.23. *Sơ đồ hệ thống điều khiển*

Trên hình 9.23:

q_d là vectơ vị trí đặt của biến khớp; q là véctơ vị trí tức thời của biến khớp;

$\dot{q}$ là véctơ tốc độ thay đổi biến khớp tương ứng;

F_M là vectơ lực động tạo nên ở khớp động. Đó là lực hoặc mômen tạo nên bởi nguồn động lực ở khớp động.

Phương trình động lực học của robot đã được viết dưới dạng ma trận (8.30):

$$F_M = D(q)\,\ddot{q} + h(q, \dot{q}) + c(q) \qquad (9.84)$$

Cấu trúc bộ điều khiển có thể lựa chọn là luật điều khiển tỷ lệ - đạo hàm (PD- Proportional - Derivative):

$$F_M = K_P\varepsilon + K_D\dot{\varepsilon} \qquad (9.85)$$

Trong đó:

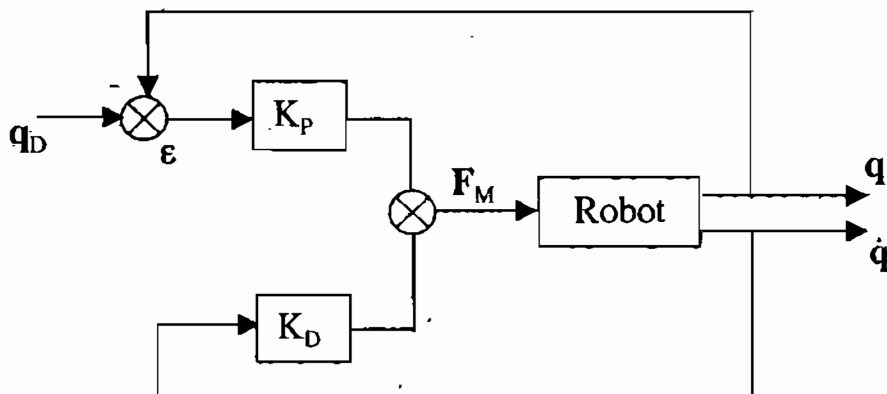
ε - sai số vị trí của khớp động: $\varepsilon = q_d - q$

$\dot{\varepsilon}$ - sai số tốc độ: $\dot{\varepsilon} = \dot{q}_d - \dot{q}$

K_P - ma trận đường chéo các hệ số khuếch đại của n khớp động: $K_P = \text{diag}(K_{P1}, K_{P2}, \ldots K_{Pn})$.

K_D - ma trận đường chéo của hệ số đạo hàm của n khớp động: $K_D = \text{diag}(K_{D1}, K_{D2}, \ldots K_{Dn})$.

Sơ đồ hệ thống điều khiển phản hồi với cấu trúc điều khiển PD có dạng đơn giản như hình 9.24.

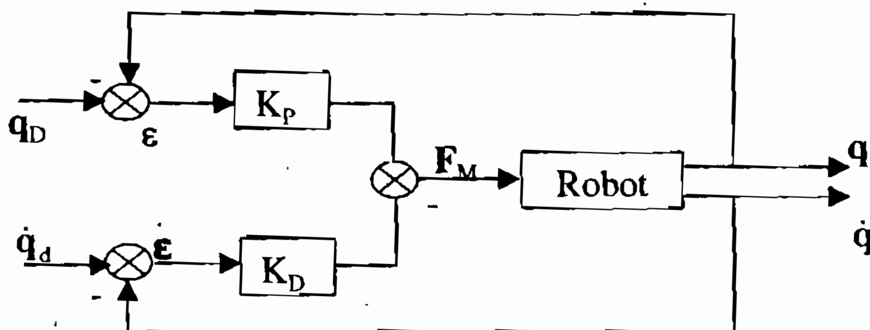


Hình 9.24. *Sơ đồ cấu trúc hệ thống với bộ điều khiển PD có độ tắt dần*

Trên sơ đồ hình 9.24, tín hiệu đặt vị trí q_d được so sánh với vị trí tức thời q và độ sai lệch ε tác động vào khâu khuếch đại với hệ số K_P. Tín hiệu ra của khâu tỷ lệ được cộng đại số với tín hiệu tắt dần tỷ lệ với tốc độ cua khớp động.

$$F_M = K_P (q_d - q) + K_D \dot{q} \qquad (9.86)$$

Hệ thống với cấu trúc luật điều khiển PD có độ tắt dần (hình 9.24) sẽ không thích hợp với một số kiểu robot. Một dạng hệ thống điều khiển khác giới thiệu trên hình 9.25 có bổ sung thêm tín hiệu đặt tốc độ $\dot{q}_d$ và độ sai lệch tốc độ $\dot{\varepsilon}$ tác động vào khâu khuếch đại K_D.



Hình 9.25. *Sơ đồ cấu trúc hệ thống với bộ điều khiển PD*

Độ chính xác tĩnh của hệ thống điều khiển có thể nâng cao bằng cách tăng hệ số khuếch đại K_P. Tuy nhiên hệ số K_P lớn sẽ làm giảm độ ổn định của hệ thống cũng như làm tăng độ nhiễu. Bộ điều khiển có cấu trúc PID (Proportional - Integral - Derivative tức là Tỷ lệ - Tích phân - Đạo hàm) sẽ khắc phục được nhược điểm đó của bộ điều khiển PD. Khi đó phương trình lực động F_M tác động lên khớp động sẽ có dạng:

$$F_M = K_P\varepsilon + K_D\dot{\varepsilon} + K_i\int_0^t \varepsilon(\tau)d\tau \qquad (9.87)$$

Trong đó:

K_i - ma trận đường chéo các hệ số tích phân của n khớp động:

$K_i = \mathrm{diag}\,(K_{i1}, K_{i2}, \dots, K_{in})$

Như vậy, tuỳ theo cấu trúc đã lựa chọn cho bộ điều khiển, ta đem đối chiếu phương trình (9.86) hoặc (9.87) với phương trình Lagrange (9.84), từ đó nhận được các phương trình của hệ điều khiển tương ứng. Từ các phương trình của hệ điều khiển này có thể lựa chọn K_P, K_D và K_i sao cho sai lệch vị trí ε sẽ tiến tới 0.

CHƯƠNG X

TRUYỀN DẪN ĐỘNG ĐIỆN CƠ

10.1. GIỚI THIỆU CHUNG

Thiết bị truyền dẫn động (Actuators & Power Transmission Devices) là phần quan trọng để hiện thực các sơ đồ động của cơ cấu tay máy và là phần quyết định kết cấu của robot. Như đã biết các sơ đồ động cơ cấu tay máy rất đa dạng và các loại hình kết cấu tay máy cũng rất phong phú. Tuy nhiên, qua thực tế sử dụng đã dần dần định hình các xu hướng về loại hình kết cấu robot.

Trong kỹ thuật robot hiện đại có 2 xu hướng cơ bản về loại hình kết cấu.

Xu hướng thứ nhất là robot *chuyên dùng* để đáp ứng một công việc rất cụ thể trong dây chuyền sản xuất và robot *chuyên môn hoá* trang bị cho một nhóm thiết bị công nghiệp nào đó để thực hiện một loại hình công việc. Các loại robot này thường có số bậc tự do không lớn, nhưng lại yêu cầu cao về mức độ thao tác nhanh, về độ chính xác và độ tin cậy. Tuy nhiên lại khó áp dụng khi cần thay đổi các thông số công nghệ.

Xu hướng thứ 2 là tạo ra các robot *đa chức năng* để thích nghi với nhiều loại hình công nghệ hoặc với phạm vi thay đổi tương đối rộng các thông số công nghệ. Các loại robot này thường có số bậc tự do cao hơn, cơ động hơn nhưng lại khó đảm bảo độ chính xác và độ tin cậy cao. Ngoài ra giá thành chế tạo lại đắt hơn và khi sử dụng, tuỳ theo công việc có lúc lại không dùng hết số bậc tự do.

Mâu thuẫn trên có thể được khắc phục nếu áp dụng nguyên tắc *môđun hoá* khi thiết kế robot. Theo đó kết cấu robot gồm các cụm chi tiết máy điển hình có chức năng hoạt động tương đối độc lập, được gọi là các môđun. Các môđun này có thể được thiết kế, chế tạo chuyên môn hoá đạt được những tính năng kỹ thuật cao với giá thành phải chăng. Khi nối ghép các môđun theo nhiều phương án khác nhau có thể tạo ra các kết cấu hình robot khác nhau. Các robot thiết kế theo kiểu môđun hoá được dùng rộng rãi khi tạo dựng các môđun sản xuất linh hoạt (Flexible Manufacturing Module).

Các thiết bị truyền dẫn động là bộ phận chủ yếu để tạo ra các môđun kết cấu tay máy. Về nguyên tắc trong kết cấu tay máy có thể dùng hầu hết các thiết bị truyền dẫn động thông thường. Tuy nhiên cũng có

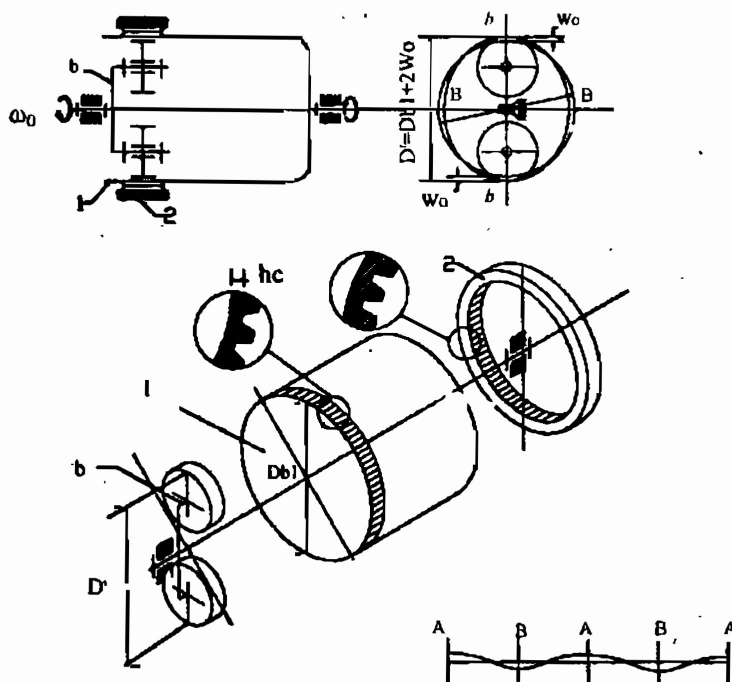
những yêu cầu riêng như là gọn nhẹ, linh hoạt, dễ điều khiển, cần triệt tiêu khe hở khi quay đảo chiều v.v... Vì vậy trong cơ cấu tay máy thường dùng một số loại thiết bị truyền dẫn động. Dưới đây trình bày một số loại thiết bị truyền dẫn động thường dùng trong kết cấu tay máy: Chương X - truyền dẫn động điện cơ, Chương XI-truyền dẫn động thuỷ khí.

10.2. TRUYỀN DẪN ĐỘNG CƠ KHÍ.

Truyền dẫn động cơ khí có rất nhiều loại hình. Chúng được dùng rộng rãi trong kỹ thuật máy nói chung và trong kỹ thuật robot nói riêng. Ngoài những loại truyền dẫn động cơ khí phổ thông đã được trình bày trong nhiều giáo trình giảng dạy kỹ thuật, ở đây chỉ đề cập đến một số thiết bị hay dùng trong kỹ thuật robot và còn tương đối mới mẻ.

10.2.1. Bộ truyền bánh răng sóng.

Truyền động bánh răng sóng (The harmonic drive) khác biệt so với các loại truyền động bánh răng khác ở chỗ nó có một bánh răng mềm truyền sóng biến dạng và nhờ vậy mà truyền được chuyển động quay (hình 10.1).



Hình 10.1. Bộ truyền bánh răng sóng.

Bộ truyền bánh răng sóng gồm 3 bộ phận cơ bản: bánh răng mềm 1, bánh răng cứng 2 và cần tạo sóng b. Bánh răng mềm có dạng ống vỏ mỏng. Một đầu ống nối với trục quay ω_1, còn đầu kia được cắt răng với số răng Z_1. Vành răng này được biến dạng đi một đại lượng $2W_0$ do cần tạo sóng gây nên. Như mô tả trên sơ đồ tiết diện cắt ngang (hình 10.1), do tác động của cần tạo sóng vành răng mềm từ hình tròn biến dạng thành hình elip. Chu vi vành răng khi biến dạng so với chu vi vành răng khi chưa biến dạng, tạo ra 2 sóng (xem hình khai triển trên hình 10.1). Phương A là phương biến dạng lớn, còn phương B là phương biến dạng nhỏ. Đỉnh sóng biến dạng nằm trên phương A, còn đáy sóng biến dạng nằm trên phương B. Tuỳ theo cách tạo sóng, số sóng biến dạng có thể là 1, 2, 3 v.v... Thông thường là bộ truyền 2 sóng và quan hệ số răng giữa bánh răng mềm với bánh răng cứng là $Z_2 - Z_1 = 2$.

Bộ truyền bánh răng sóng còn dùng để truyền chuyển động qua vách ngăn kín, cho nên vỏ mỏng 1 thường làm kín một đầu. Cần tạo sóng dùng để hình thành và truyền sóng biến dạng trên bánh răng mềm. Có thể tạo sóng bằng phương pháp cơ khí, điện từ, thuỷ lực, khí nén. Theo phương pháp cơ khí có thể dùng 2 con lăn, 4 con lăn, đĩa lăn, vòng lăn hoặc cam lăn.

Động học bánh răng truyền sóng:

Ứng với mỗi vòng quay của cần tạo sóng, một răng của bánh răng mềm 1 sẽ có 2 lần vào ăn khớp với bánh răng cứng. Giả sử bánh răng cứng 2 được giữ không quay, nếu cần tạo sóng quay hết 1 vòng ($\varphi_b = 2\pi$) thì trục quay của bánh răng mềm sẽ quay theo chiều ngược lại một góc bằng $\varphi_1 = 2\pi(Z_1 - Z_2)/Z_1$.

Từ quan hệ các góc quay đó suy ra quan hệ các vận tốc góc:

$$u_{b1}^{(2)} = \frac{\omega_b}{\omega_1} = \frac{2\pi}{\frac{2\pi}{Z_1}(Z_1 - Z_2)} = -\frac{Z_1}{Z_2 - Z_1} \qquad (10.1)$$

Bây giờ giả sử giữ cho bánh răng mềm 1 không quay nếu cần tạo sóng quay trọn một góc $\varphi_b = 2\pi$ thì bánh răng cứng 2 sẽ quay cùng phương như cần tạo sóng một góc quay là $\varphi_2 = 2\pi(Z_2 - Z_1)/Z_2$.

Từ đó, ta có:

$$u_{b2}^{(1)} = \frac{\omega_b}{\omega_2} = \frac{2\pi}{\frac{2\pi}{Z_2}(Z_2 - Z_1)} = \frac{Z_2}{Z_2 - Z_1} \qquad (10.2)$$

Các biểu thức (10.1); (10.2) chứng tỏ tỷ số truyền của bộ truyền bánh răng sóng chỉ phụ thuộc vào các số răng.

Trên hình 10.2 là sơ đồ bộ truyền bánh răng sóng 2 cấp. Trong trường hợp này bánh răng mềm 1 có 2 vành răng Z_1 và Z_3, ăn khớp với các bánh răng cứng 2 và 4 với số răng là Z_2 và Z_4 tương ứng. Trong đó bánh răng cứng 2 là cố định. Chuyển động quay được truyền từ cần tạo sóng 3 đến bánh răng cứng 4 nhờ 2 sự ăn khớp sóng.

Tỷ số truyền của bộ truyền bánh răng sóng nhiều cấp xác định tương tự như bộ truyền bánh răng hành tinh với công thức sau:

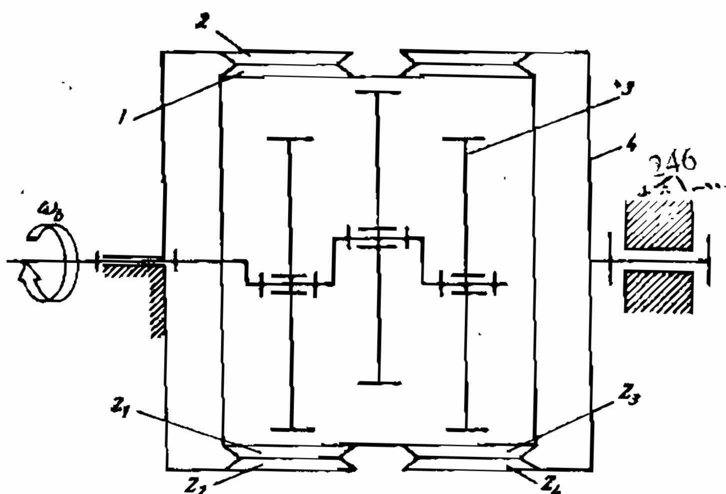
$$u_{b4} = \frac{Z_1 Z_4}{Z_1 Z_4 - Z_2 Z_3} \tag{10.3}$$

Trong bộ truyền bánh răng sóng có cấu tạo như một khớp nối trục (hình10.2), nếu lấy $Z_3 = Z_1$ và $Z_4 = Z_1$, thì trục đầu ra của khớp nối trục gắn liền với bánh răng 4 và tỷ số truyền sẽ là:

$$u_{b4} = -\frac{Z_1}{Z_2 - Z_1} \tag{10.4}$$

Nếu lấy $Z_3 = Z_1$ và $Z_2 = Z_1$, thì trục đầu ra gắn liền với bánh răng 4 và có tỷ số truyền là:

$$u_{b4} = -\frac{Z_4}{Z_4 - Z_1} \tag{10.5}$$

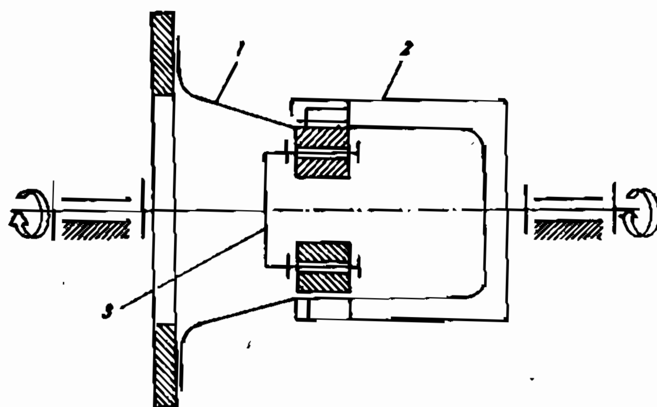


Hình 10.2. *Bộ truyền bánh răng sóng 2 cấp.*

Đặc điểm ăn khớp của bánh răng sóng.

- Nhờ có bánh răng mềm biến dạng được nên khe hở giữa các cặp răng Z_1 và Z_2 ở miền đỉnh sóng là rất bé, hoặc gần như triệt tiêu.

- Cũng nhờ sự biến dạng của bánh răng mềm nên trong bộ truyền bánh răng sóng có số lớn cặp răng cùng ăn khớp (đến 40%).



Hình 10.3. *Bộ truyền bánh răng sóng xuyên qua vách ngăn*

- Bộ truyền bánh răng sóng đạt được tỷ số truyền lớn. Đối với bộ truyền dùng bánh răng mềm bằng thép, nếu một cấp thì u = 50 ÷ 300, nếu 2 cấp thì u = 200 ÷ 10^4 hoặc còn có thể cao hơn nữa.

- Do có nhiều cặp răng cùng ăn khớp và có thể tạo ra một vài vùng ăn khớp đồng thời, cho nên có thể bù trừ được các sai số chế tạo, sai số lắp ráp và nói chung đạt được độ chính xác động lực tương đối cao. Cũng nhờ vậy mà bộ truyền bánh răng sóng làm việc đều hoà và ít gây tiếng ồn hơn so với các loại bánh răng khác.

- Hiệu suất bộ truyền bánh răng sóng cũng không thấp, ví dụ, khi tỷ số truyền u = 50 ÷ 200 thì hiệu suất trong khoảng 70 ÷ 85%.

- Ngoài ra bộ truyền bánh răng sóng còn có ưu điểm nữa là nhờ có vành răng mềm ở một đầu ống vỏ mỏng, biến dạng lại không lớn, ống vỏ mỏng có thể làm một đầu kín nên có thể tạo ra cơ cấu bộ truyền xuyên qua vách ngăn kín giữa 2 môi trường khác nhau (xem hình10.3). Đối với bánh răng mềm bằng thép thì độ biến dạng W_o = (0,003 ÷ 0,015)d_1, còn chiều dày vỏ mỏng chỗ chân răng h_c = (0,005 ÷ 0,03)d_1, với d_1 là đường kính ống vỏ mỏng.

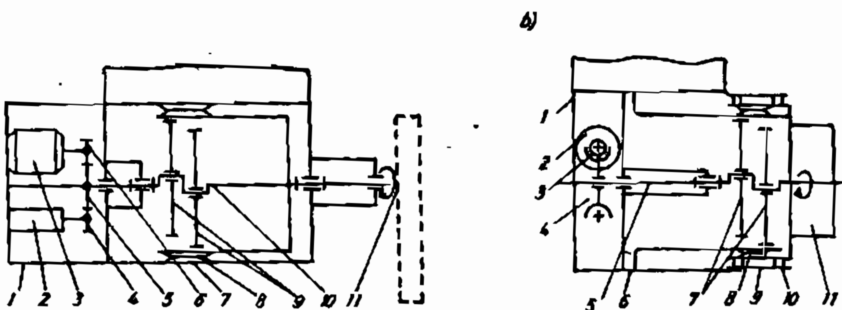
Sử dụng truyền động bánh răng sóng.

Do có các tính chất nói trên, truyền động bánh răng sóng được dùng chủ yếu ở các bộ truyền cần tỷ số truyền cao, các bộ truyền đòi hỏi độ chính xác cao, các cơ cấu có quán tính nhỏ và yêu cầu tác động nhanh trong hệ thống điều khiển tự động, các khớp động trong tay máy. Ngoài ra còn dùng để truyền chuyển động xuyên qua vách ngăn và kín khít đối với môi trường hoá chất hoặc phóng xạ v...v.

Dưới đây giới thiệu một vài ứng dụng truyền động bánh răng sóng trong kết cấu robot.

Trên hình 10.4 là sơ đồ cấu tạo một khớp quay dùng bánh răng sóng. Trong thân hộp 1 đặt động cơ điện 3 và bộ phận 2 nhận tín hiệu phản hồi liên hệ với trục động cơ bằng các bánh răng 4, 5, 6. Bánh răng 5 gắn liền với trục 10 đấu vào bộ truyền bánh răng sóng. Trục 10 là trục khuỷu, trên đó gắn các đĩa 9 để tạo sóng biến dạng cho bánh răng mềm 8. Bánh răng 8 này ăn khớp với bánh răng cứng 7 cố định và gắn với trục đầu ra 11 của bộ truyền bánh răng sóng. Trục 11 gắn liền với khâu tiếp theo của cơ cấu tay máy.

Sơ đồ áp dụng trên hình 10.4a chỉ thích hợp với trường hợp công suất động cơ không lớn. Khối lượng của động cơ không vượt quá khối lượng của bộ truyền bánh răng sóng. Thường thường phải lắp một phanh hãm ôm lấy trục động cơ khi ngắt điện, bởi vì bộ truyền bánh răng sóng một cấp có thể quay ngược, tức là không tự hãm được. Khi lắp phanh hãm thường làm giảm độ tin cậy của bộ truyền và gây nên tải trọng động không mong muốn lúc phanh hãm. Bởi thế có thể áp dụng phương án khác dùng các cơ cấu có thể tự hãm được, ví dụ, bánh vít trục vít như hình 10.4.



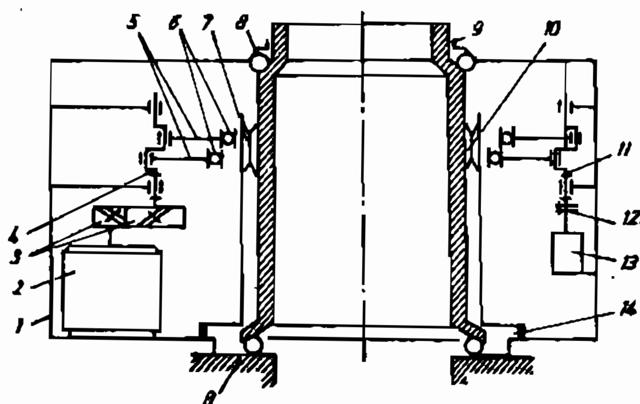
Hình 10.4. *Sử dụng bộ truyền bánh răng sóng trong khớp quay tay máy*

Sơ đồ trên hình 10.4b gồm có động cơ điện 2 lắp trong thân hộp 1 có trục nối liền với trục vít 3, ăn khớp với bánh vít 4. Trục bánh vít 4 nối với trục đầu vào 5 của bộ truyền bánh răng sóng. Các đĩa 7 lắp lệch tâm trên trục 5 sẽ gây biến dạng sóng cho bánh răng mềm 8, ăn khớp với bánh răng cứng 9. Bánh răng mềm 8 có dạng hình ống vỏ mỏng, được cố định nhờ bộ phận 6. Còn bánh răng cứng 9 lại quay trong ổ bi 10. Chính ổ bi 10 cũng là khớp quay của khâu 11 tiếp theo.

Nhược điểm của cả hai sơ đồ hình 10.4a và 10.4b là do để đảm bảo độ dài của các bánh răng mềm cho nên làm tăng các khối lượng và kích thước chiều trục của các khớp quay. Ngoài ra với các kết cấu nói trên sẽ khó khăn luồn dây cáp điện từ khâu này sang khâu kia của tay máy.

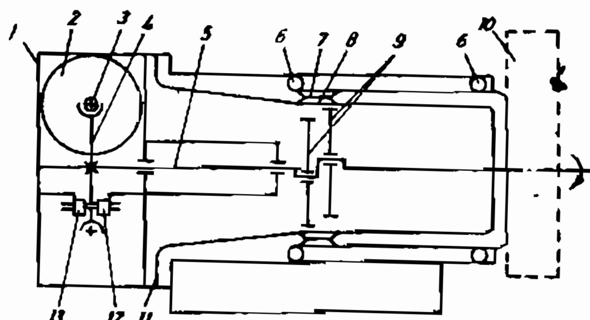
Trên hình 10.5 là sơ đồ khớp quay thân của robot ASEA IRb - 6, dùng bộ truyền bánh răng sóng có trục rỗng, thuận tiện cho việc luồn các dây cáp điện. Trong thân hộp cố định 1 lắp động cơ điện 2. Tiếp theo là cặp bánh răng 3 có góc răng nghiêng lớn để tự hãm được. Trục bánh răng 3 nối liền với trục khuỷu chủ động 4, trên đó lắp các đĩa 5 cùng các vòng bi 6 gây biến dạng cho vành răng mềm 7. Vành răng mềm 7 là vành răng trong ống mỏng được cố định với thân hộp nhờ bộ phận 14. Vành răng mềm 7 ăn khớp với vành răng cứng 10 trên ống trụ rỗng 9. Ống trụ 9 quay trong các ổ bi 8. Ngoài trục khuỷu chủ động 4 có lắp thêm trục khuỷu bị động 11 và nhờ các đĩa lăn tương tự mà trục 11 quay rồi qua khớp trục 12 truyền tín hiệu quay đến bộ phậm cảm biến phản hồi 13.

Đối với các robot làm việc trong môi trường đặc biệt, ví dụ, trong môi trường ăn mòn, cần phải cách ly các bộ truyền động và động cơ điện với môi trường đó. Trong trường hợp này có thể sử dụng bộ truyền bánh răng sóng có bánh răng mềm được làm kín, như trên hình 10.6.



Hình 10.5. *Sơ đồ khớp quay thân robot IRb - 6 dùng bánh răng sóng.*

Trong thân hộp 1 (hình 10.6) lắp đặt động cơ điện 2. Trục của nó nối liền với trục vít 3, bánh răng vít 4 và truyền chuyển động sang trục 5 là trục đầu vào của bộ truyền bánh răng sóng. Bánh răng mềm 8 có dạng một ống vỏ mỏng bịt kín một đầu và nối với thân hộp 1 bằng các bộ phận làm kín 11. Các đĩa 9 tạo sóng biến dạng cho vành răng mềm 8, ăn khớp với bánh răng cứng 7. Bánh răng này quay tròn trên các ổ bi 6 và phần cuối của nó gắn liền khâu 10 tiếp theo. Như vậy, các bộ phận bên trong



Hình 10.6. *Sơ đồ khớp quay robot dùng bánh răng sóng làm việc ở môi trường đặc biệt*

thân hộp hoàn toàn được cách ly với môi trường bên ngoài. Nếu trên mặt đĩa bánh vít có khoan các lỗ và đặt nguồn sáng 12 ở một phía, còn phía kia đặt tế bào quang điện 13 thì đó là một cơ cấu cảm biến đơn giản nhận tín hiệu phản hồi vì góc quay hoặc tốc độ quay qua hệ thống đếm xung.

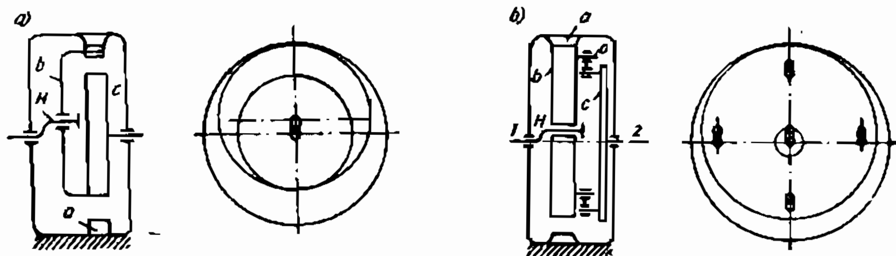
10.2.2. Bộ truyền động bánh răng con lăn - cycloid hành tinh.

Trong những năm gần đây truyền động bánh răng cycloid hành tinh lại được quan tâm nghiên cứu cải tiến và ứng dụng tương đối rộng rãi ở các bộ truyền dẫn trong robot. Truyền động này có nhiều ưu điểm như: đạt được tỷ số truyền cao, gọn nhẹ, độ bền và độ chính xác đều cao hơn so với nhiều loại truyền động khác. Tuy nhiên lại yêu cầu cao về độ chính xác chế tạo và lắp ráp.

Trên hình 10.7a là sơ đồ một hộp giảm tốc bánh răng cycloid hành tinh, gồm bánh răng trung tâm cố định a, cần quay H, bánh răng vệ tinh b và bánh răng c.

Trên hình 10.7b giới thiệu thêm một sơ đồ hộp giảm tốc bánh răng cycloid hành tinh. Bánh răng b có số răng Z_1, bánh răng a có số răng $Z_2 = Z_1 + 1$. Khi quay cần H bánh răng vệ tinh b có chuyển động song phẳng và nhờ cơ cấu tay quay d làm cho bánh răng c quay theo. Tỷ số truyền từ cần quay đến trục của bánh c là $u_{HC} = - Z_1$.

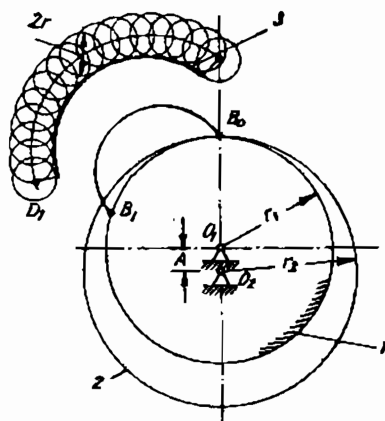
Đối với hộp giảm tốc 1 cấp tỷ số truyền đạt tới 87 còn đối với hộp giảm tốc 2 cấp hoặc 3 cấp có thể đạt được tỷ số truyền rất cao.



Hình 10.7. *Sơ đồ hộp giảm tốc bánh răng cycloid hành tinh*

Trong cặp bánh răng cycloid hành tinh, một bánh có răng hình con lăn, còn bánh răng ăn khớp với nó có dạng răng họ đường epicyloid.

Trên hình 10.8, r_1 và r_2 là bán kính vòng lăn (vòng tâm tích). Khi lăn vòng r_2 trên vòng r_1, một điểm B nào đó nằm trên vòng tròn r_2 sẽ vẽ nên đường epicyloid B_0B_1. Nếu thay điểm B_0 bằng điểm D_0 cũng gắn liền với vòng trong r_2 nhưng nằm phía ngoài vòng r_2 thì khi lăn vòng r_2 trên vòng r_1, điểm D_0 sẽ vẽ nên đường D_0D_1 epicyloid kéo dài (inflected epicyloid). Bây giờ nếu thay điểm D_0 bằng chốt đường kính 2r thì khi lăn vòng r_2 trên vòng r_1 bao hình của các con lăn là đường số 3 cách đều đường epicyloid kéo dài. Đó chính là dạng răng ăn khớp với bánh răng con lăn! Như vậy đối với bộ truyền bánh răng con lăn, cặp bánh răng ăn khớp với nhau có biên dạng là đường số 3 và vòng tròn bán kính r của con lăn.



Hình 10.8. *Sơ đồ tạo hình ăn khớp bánh răng cycloid*

Quá trình hình thành đường B_0B_1 và đường D_0D_1 đều hoàn thành khi bánh 2 quay đi cùng một góc bằng 2π. Khi đó vòng lăn 2 đã lăn đi vừa tròn một vòng $2\pi r_2$, còn vòng lăn 1 đã lăn đi một độ dài là :

$$2\pi r_1 = \overline{B_0B_1} = 2\pi r_1 + 1 \qquad (10.6)$$

với t là bước răng.

Do đó:

$$t = 2\pi (r_2 - r_1) = 2\pi A. \quad (10.7)$$

Với $A = 0_1 0_2$. Mặt khác ta có:

$$t = \frac{2\pi r_1}{Z_1} \quad (10.8)$$

Với Z_1 là số (nguyên) lần đường B_0B_1 vẽ được trên chu vi vòng lăn 1. So sánh (10.7), (10.8) ta có:

$$r_1 = AZ_1 \quad (10.9)$$

và

$$r_2 = r_1 + A = A(Z_1 + 1) \quad (10.10)$$

Vì rằng:

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{Z_1}{Z_2}. \quad (10.11)$$

và trên cơ sở (10.9), (10.10) ta có

$$Z_2 = Z_1 + 1. \quad (10.12)$$

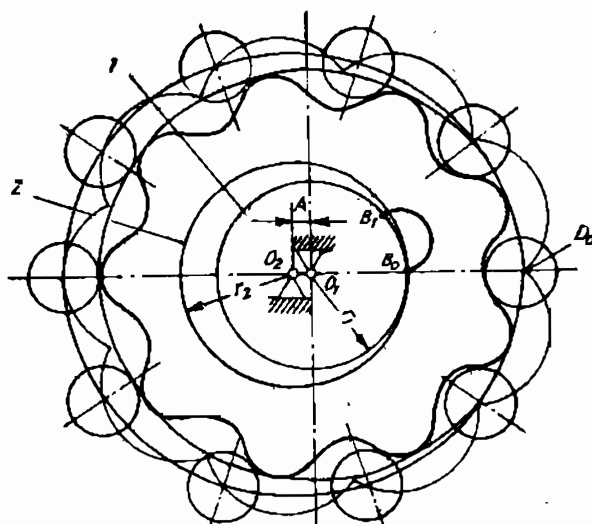
Nói cách khác, số con lăn Z_2 phân bố trên bánh 2 phải lớn hơn số răng Z_1 (số đường B_0B_1) của bánh 1 là 1 đơn vị.

Từ (10.11) và (10.12) , ta có:

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{Z_1}{Z_1 + 1}. \quad (10.13)$$

Trên hình 10.9 là bộ truyền bánh răng có biên dạng răng ăn khớp với con lăn là đường cách đều epicycloid keó dài gọi tắt là bộ truyền bánh răng con lăn - epicycloid.

Tương tự với bộ truyền răng con lăn - epicycloid, có thể tạo ra bộ truyền bánh răng con lăn - hypocycloid. Khi vòng lăn r_1 lăn trên vòng lăn r_2 thì điểm B_0 nằm trên vòng lăn r_1 sẽ vẽ nên đường hypocycloid B_0B_1 và điểm D_0 gắn liền với vòng lăn r_1 nhưng nằm phía ngoài vòng lăn r_1 sẽ vẽ nên đường hypocycloid kéo dài D_0D_1. Cặp bánh răng ăn khớp có biến dạng răng tương ứng là vòng tròn con lăn bán kính r ăn khớp với đường cách đều (khoảng r) so với đường hypocycloid kéo dài.



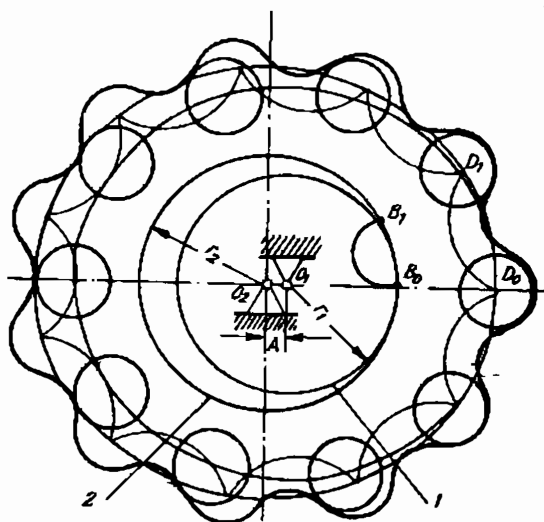
Hình 10.9. *Bộ truyền bánh răng con lăn - epicycloid.*

Theo cách suy luận như đã làm ở trên, ta có

$$Z_2 = Z_1 + 1, \tag{10.14}$$

và

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{Z_1}{Z_1 + 1}. \tag{10.15}$$



Hình 10.10. *Bộ truyền bánh răng con lăn - hypocycloid.*

Trên hình 10.10 là bộ truyền bánh răng có biên dạng răng ăn khớp với con lăn là đường cách đều hypocycloid kéo dài, gọi tắt là bộ truyền bánh răng con lăn - hypocycloid.

Sự khác biệt của bộ truyền bánh răng con lăn - hypocycloid so với bộ truyền bánh răng con lăn - epicycloid là các con lăn được bố trí trên bánh 1 chứ không phải trên bánh 2.

Cả 2 loại truyền động bánh răng cycloid này có đặc điểm là chỗ các răng tiếp xúc với nhau đều nằm ngoài vùng tâm quay tức thời (là tiếp

điểm của 2 vòng lăn hoặc 2 vòng tâm tích) nên còn có tên gọi là truyền động bánh răng "ngoài tâm tích".

Theo lí thuyết ăn khớp thì nếu điểm tiếp xúc nằm càng xa trung tâm tức thời thì vận tốc trượt giữa hai mặt răng ăn khớp càng lớn, do vậy hiệu suất càng thấp và càng chóng mòn. Tuy thuộc loại ăn khớp "ngoài tâm tích" nhưng ở truyền động bánh răng con lăn vận tốc trượt lại rất thấp, bởi vì vận tốc góc tương đối ω_{12} rất thấp.

$$\omega_{12} = |\omega_1 - \omega_2| = \omega_1 \left|1 - \frac{\omega_2}{\omega_1}\right| = \omega_1 \left|\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2}\right| \qquad (10.16)$$

Khi $Z_2 - Z_1 = 1$ thì $\omega_{12} = \omega_1\, 1/Z_2$

Một đặc điểm nữa đáng lưu ý của các truyền động ăn khớp cycloid nói trên là về nguyên lý thì tất cả các con lăn đều đồng thời tiếp xúc với mặt răng tương ứng, cho nên khả năng truyền lực là rất lớn. Điều này xuất phát từ lý do là tâm của tất cả các con lăn đều nằm cách đều đường D_0D_1 và biên dạng của răng ăn khớp với con lăn lại là đường bao hình của các vị trí con lăn, cách đều đường D_0D_1. Điểm tiếp xúc giữa biên dạng răng và con lăn sẽ là điểm mà pháp tuyến của biên dạng răng đi qua tâm con lăn.

Tuy rằng tất cả các con lăn đều đồng thời tiếp xúc với mặt răng tương ứng, nhưng vì truyền lực chỉ theo một chiều cho nên tối đa là chỉ có nửa số con lăn tham gia vào ăn khớp. Vậy hệ số trùng khớp của bánh răng con lăn cycloid là:

$$\varepsilon = \frac{Z_c}{2} \qquad (10.17)$$

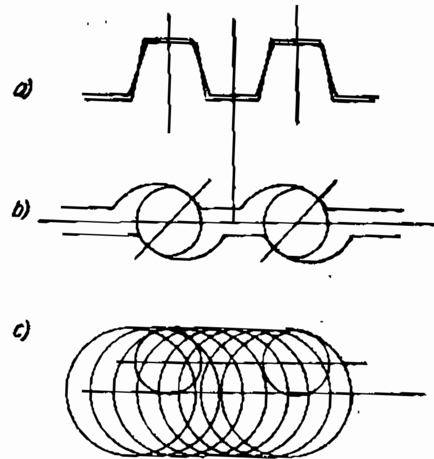
với Z_c - số răng con lăn. Thực tế số răng con lăn trực tiếp tham gia ăn khớp có thể ít hơn $\frac{Z_c}{2}$ do sai số chế tạo và lắp ráp.

Đặc điểm các con lăn đều đồng thời tiếp xúc nói trên đã lý giải về một ưu điểm nữa của bộ truyền bánh răng con lăn cycloid là làm việc êm khi đảo chiều.

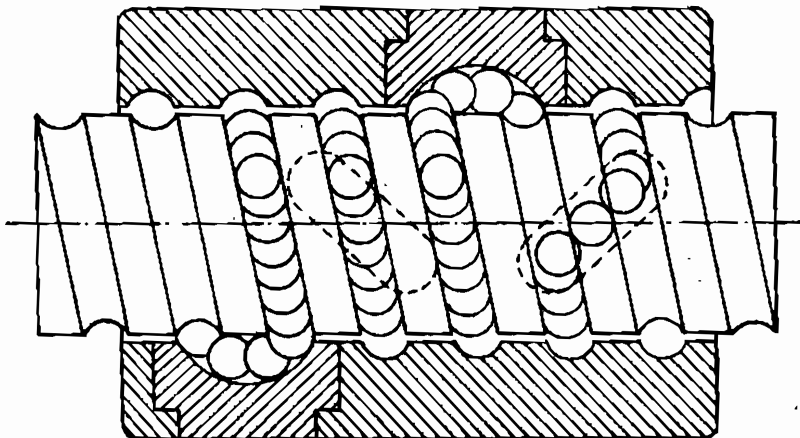
10.2.3. Truyền động vít đai ốc bi.

Truyền động vít đai ốc bi (ball screws) được dùng đầu tiên trong cơ cấu tay lái của ô tô ở hãng General Motors. Những năm đầu của những năm 50, Beaver Precision là hãng đầu tiên thiết kế và chế tạo bộ truyền đai

ốc bi cho các máy điều khiển số. Ngày nay đã rất nhiều hãng sản xuất bộ truyền vít đai ốc bi, nhiều cải tiến mới và ứng dụng rất rộng rãi trong nhiều lĩnh vực, trong đó có kỹ thuật robot. Công dụng chủ yếu của bộ truyền vít đai ốc bi là để biến chuyển động quay sang chuyển động tịnh tiến. Nhiệm vụ này có thể được thực hiện bằng bộ truyền thanh răng - bánh răng hoặc bộ truyền vít đai ốc thường. Tuy nhiên, như trên hình 10.11 mô tả bộ truyền vít đai ốc thường, ví dụ, vít đai ốc ren hình thang (hình 10.11a) thì tiếp xúc giữa đai ốc và ren vít là tiếp xúc giữa 2 bề mặt, nên tổn thất ma sát rất lớn. Còn nếu cho chen bi giữa 2 mặt ren lõm của đai ốc và vít (hình 10.11b) thì hiệu suất của bộ truyền có thể lên tới 90%. Tuy nhiên diện tích tiếp xúc lại bé đi, nên khả năng chịu tải thấp hơn. Vì vậy phải chọn lựa hợp lí quan hệ đường kính viên bi và đường kính tiết diện cắt ngang của các rãnh lăn, phù hợp các điều kiện ứng dụng cụ thể, như tốc độ di chuyển, hiệu ứng màng dầu thuỷ động, kích cỡ bộ truyền v...v.



Hình 10.11. *Sơ đồ tiếp xúc trong bộ truyền vít đai ốc bi*


Hình 10.12. *Sơ đồ kết cấu bộ truyền vít đai ốc bi*

Kết cấu bộ truyền vít đai ốc bi ngày nay đã có nhiều loại hình khác nhau, ví dụ, vít đai ốc bi có thể luân chuyển bi trong rãnh, hoặc vít đai ốc lăn có chuyển động con lăn hành tinh (planetary roller screw) v.v... Trên hình 10.12 giới thiệu sơ đồ kết cấu bộ truyền vít đai ốc bi loại thường dùng.

Như trên đã nhắc, việc chọn lựa hình dáng và kích thước rãnh bi lăn có liên quan nhiều đến công nghệ chế tạo và khả năng đạt được độ chính xác gia công. Trong [51] đề cấp đến vấn đề tạo hình các mặt ren lõm.

Các ưu điểm chủ yếu của truyền động vít đai ốc bi là hiệu suất cao, độ chính xác định vị cao, độ bền cao và mômen khởi động thấp. Tuy nhiên, giá thành tương đối cao và đòi hỏi bảo dưỡng, tu sửa thường xuyên.

10.3. ỨNG DỤNG TRUYỀN ĐỘNG ĐIỆN

Truyền động điện được dùng khá nhiều trong kỹ thuật robot, vì có những ưu điểm như là điều khiển đơn giản không phải dùng các bộ biến đổi phụ thêm, không gây bẩn cho môi trường, các loại động cơ hiện đại có thể lắp trực tiếp trên các khớp quay v...v.

Tuy nhiên so với truyền động thuỷ khí thì truyền động điện có tỷ lệ thấp giữa công suất truyền trên một đơn vị khối lượng và thông thường đòi hỏi kèm theo hộp giảm tốc cồng kềnh vì trong tay máy tốc độ quay rất chậm v.v....

Trong kỹ thuật robot về nguyên tắc có thể dùng động cơ điện các loại khác nhau, nhưng trong thực tế chỉ có 2 loại được dùng nhiều hơn cả. Đó là động cơ điện một chiều và động cơ bước.

Ngày nay do những thành công mới trong nghiên cứu điều khiển động cơ xoay chiều, nên cũng có xu hướng chuyển sang sử dụng động cơ xoay chiều để tránh phải trang bị thêm bộ nguồn điện 1 chiều. Ngoài ra loại động cơ một chiều không chổi góp (DC brushless motor) cũng bắt đầu được ứng dụng nhiều.

10.3.1. Động cơ điện một chiều.

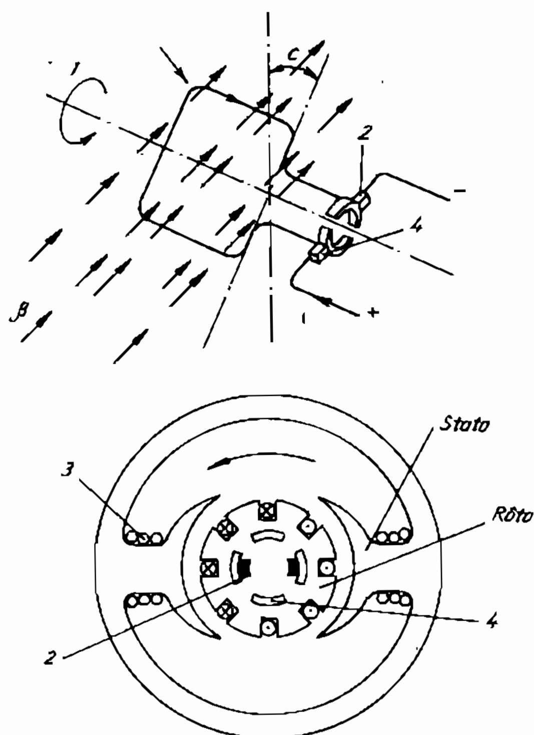
Đại cương về động cơ điện một chiều

Động cơ điện một chiều gồm có 2 phần (hình 10.13):

a) Stato cố định với các cuộn dây có dòng điện cảm hoặc dùng nam châm vĩnh cửu. Phần này còn gọi là *phần cảm*. Phần cảm tạo nên từ thông trong khe hở không khí.

b) Roto với các thanh dẫn. Khi có dòng điện một chiều chạy qua và với dòng từ thông xác định, roto sẽ quay. Phần này còn gọi là *phần ứng*.

Trên hình 10.13: 1-thanh dẫn, 2-chổi góp, 3-cuộn dây, 4 - vòng góp



Hình 10.13. *Sơ đồ động cơ điện một chiều.*

Do cách khác nhau khi bố trí dây cuốn phần cảm so với phần ứng ta có những loại động cơ điện một chiều khác nhau:

- Động cơ kích từ song song.
- Động cơ kích từ nối tiếp.
- Động cơ kích từ hỗn hợp.

Các đại lượng chủ yếu xác định sự làm việc của động cơ một chiều là:

U - điện áp cung cấp của phần ứng.

I - cường độ dòng điện trong phần ứng.

r - điện trở trong của phần ứng.

ϕ - từ thông trong khe hở.

E - sức phản điện động phần ứng.

Các quan hệ cơ bản khi làm việc là:

$$E = U - rI = kn\phi \qquad (10.18)$$

k phụ thuộc vào đặc tính của dây cuốn và số thanh dẫn tác dụng của phần ứng.

Từ (10.18) có các nhận xét sau:

1)Khởi động E bằng 0 khi mở máy, chỉ có điện trở phần ứng r rất nhỏ hạn chế dòng điện. Vì thế cần phải có biến trở mở máy để duy trì I ở giá trị thích hợp.

2) Số vòng quay:

$$n = \frac{U - Ir}{k\phi} \qquad (10.19)$$

Vậy, điều chỉnh tốc độ có thể tiến hành bằng cách tác động vào điện áp U hoặc tác động vào từ thông ϕ.

3) Mômen động C xác định từ phương trình cân bằng công suất.

$$EI = 2\pi nC \qquad (10.20)$$

Kết hợp với (9.18), ta có:

$$C = 2\frac{k\phi I}{\pi} \qquad (10.21)$$

Điều chỉnh tốc độ động cơ điện một chiều.

Về phương diện điều chỉnh tốc độ thì động cơ điện một chiều có nhiều ưu việt hơn hẳn các động cơ khác. Khả năng điều chỉnh tốc độ dễ dàng trong dải rộng và có cấu trúc mạch lực và mạch điều khiển đơn giản.

Như đã nói ở trên, có 2 phương pháp cơ bản để điều chỉnh tốc độ động cơ điện một chiều:

- Tác động lên từ thông ϕ thông qua việc điều chỉnh điện áp dòng kích từ.

- Điều chỉnh điện áp phần ứng.

Khi điều chỉnh tốc độ từ 0 đến tốc độ định mức bằng cách giữ từ thông không đổi và tác động vào điện áp phần ứng U thì mômen sẽ không đổi, còn công suất tăng theo tốc độ.

Khi điều chỉnh tốc độ từ 0 đến tốc độ định mức bằng cách tác động lên từ thông và giữ điện áp phần ứng không đổi thì công suất không đổi, còn mômen giảm theo tốc độ.

Khi từ thông tiến về 0 thì tốc độ tiến đến vô cùng (10.19). Vì vậy khi không tải động cơ kích từ nối tiếp có tốc độ quá lớn, các loại động cơ kích từ song song hoặc hỗn hợp đều quá tốc độ nếu cắt mạch kích từ của nó.

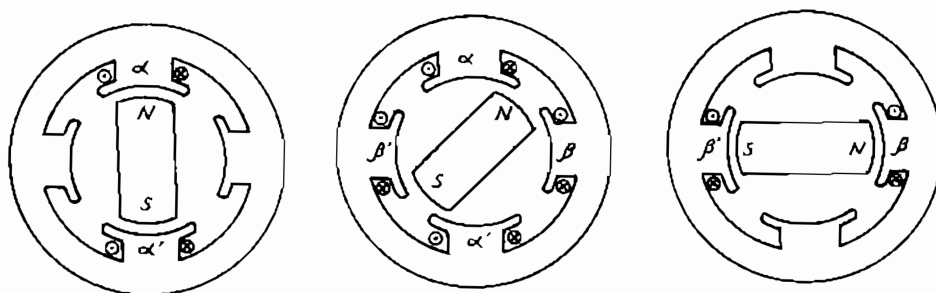
Đảo chiều quay.

Chiều quay của phần ứng phụ thuộc vào chiều dòng điện trong dây quấn phần ứng và chiều của từ trường. Để đổi chiều quay của động cơ điện một chiều cần đổi hoặc chiều của từ thông (tức là chiều của dòng điện kích từ) hoặc chiều dòng điện phần ứng.

10.3.2 Động cơ bước.

Nguyên tắc hoạt động.

Trên hình 10.14 là sơ đồ động cơ bước (stepping motor) loại đơn giản nhất dùng nam châm vĩnh cửu gồm stato có 4 cực và roto có 2 cực. Nếu cấp điện cho cuộn dây α α' thì roto sẽ dừng ở vị trí mà dòng từ qua cuộn dây là lớn nhất. Nếu cấp điện cho cuộn dây β β' thì roto sẽ quay đi $\pm 90^0$ (phụ thuộc vào chiều dòng điện cấp vào). Khi đồng thời cấp điện cho cả 2 cuộn dây α và β thì roto sẽ dừng ở vị trí giữa 0^0 đến 90^0 và nếu dòng điện vào 2 cuộn dây hoàn toàn như nhau thì roto sẽ dừng ở vị trí 45^0.



Hình 10.14. *Sơ đồ nguyên lý hoạt động của động cơ bước*

Như vậy, vị trí của roto phụ thuộc vào số cực được cấp trên stato và vào chiều của dòng điện cấp vào.

Trên đây là sơ đồ nguyên lý hoạt động của động cơ bước loại có ít cực và dùng nam châm vĩnh cửu. Trên cơ sở đó có thể tìm hiểu các loại động cơ có nhiều cực và dùng nam châm điện có từ tính thay đổi

Vậy là tuỳ theo cách cấp điện cho các cuộn dây trên stato có thể điều khiển các vị trí dừng cuả rotor. Việc cấp điện vào các cuộn dây có thể số hoá, cho nên có thể hiểu động cơ bước là một loại động cơ điện, chuyển các tín hiệu số đầu vào thành các chuyển động cơ học từng nấc ở đầu ra.

Ưu nhược điểm.

Việc sử dụng chúng trong hệ thống điều khiển có nhiều thuận lợi:

- Không cần mạch phản hồi cho cả điều khiển vị trí và vận tốc.

- Thích hợp với các thiết bị điều khiển số.

Ưu điểm lớn nhất của động cơ bước trong điều khiển vị trí là không cần phản hồi (khi điều khiển chính xác số bước quay của động cơ, đếm số bước có thể xác định vị trí chính xác mà không cần đến phản hồi vị trí) và điều khiển số trực tiếp (ghép nối trực tiếp với máy tính). Với khả năng điều khiển số trực tiếp, động cơ bước trở thành rất thông dụng trong các thiết bị hiện đại như robot công nghiệp, máy công cụ điều khiển số, các thiết bị ngoại vi của máy tính như trong máy in kim, bộ điều khiển ổ đĩa máy vi tính, máy vẽ. v.v...

Tuy vậy, phạm vi ứng dụng của động cơ bước vẫn là ở vùng công suất nhỏ và trung bình. Việc nghiên cứu nâng công suất của động cơ bước đang là vấn đề rất được quan tâm hiện nay. Ngoài ra nói chung hiệu suất của nó thấp hơn so với nhiều loại động cơ khác.

Các thông số của động cơ bước.

Góc quay:

Động cơ bước quay 1 góc xác định ứng với mỗi xung kích. Góc bước θ càng nhỏ thì độ phân giải vị trí càng cao. Số bước s là một thông số quan trọng.

$$s = \frac{360^0}{\theta} \qquad (10.22)$$

Tốc độ quay và tần số xung

Tốc độ quay của động cơ bước phụ thuộc vào số bước trong 1 giây. Đối với hầu hết các động cơ bước, số xung cấp cho động cơ bằng số

bước nên tốc độ có thể tính theo tần số xung f. Tốc độ quay của động cơ bước tính theo công thức sau:

$$n = \frac{60f}{s} \qquad (10.23)$$

trong đó: n - tốc độ quay (vòng/giây)

f - tần số bước (H_Z)

s - số bước

Ngoài ra còn các thông số quan trọng khác như độ chính xác vị trí và tỷ số mômen và quán tính roto. Độ chính xác vị trí của động cơ bước phụ thuộc vào đặc tính của động cơ, vào độ chính xác chế tạo v...v. Tỷ số mômen và quan tính roto có ảnh hưởng quyết định đến khả năng dừng ngay khi chuỗi xung điều khiển đã ngắt.

Các loại động cơ bước.

Tuỳ theo kiểu của roto, động cơ bước được chia thành các loại sau:

- Động cơ bước loại từ trở biến đổi (VR).
- Động cơ bước nam châm vĩnh cửu (PM).
- Động cơ bước kiểu lai (hybrid).

Tuỳ theo số cuộn dây độc lập trên stato động cơ bước được chia thành các loại: 2 pha, 3 pha hoặc 4 pha.

Động cơ bước có thể được phân theo cách nối dây, không liên quan đến số pha. Trên hình 10.15 giới thiệu các cách nối dây:

a/ 2 pha: 4 đầu dây　　b/ 2 pha: 6 đầu dây

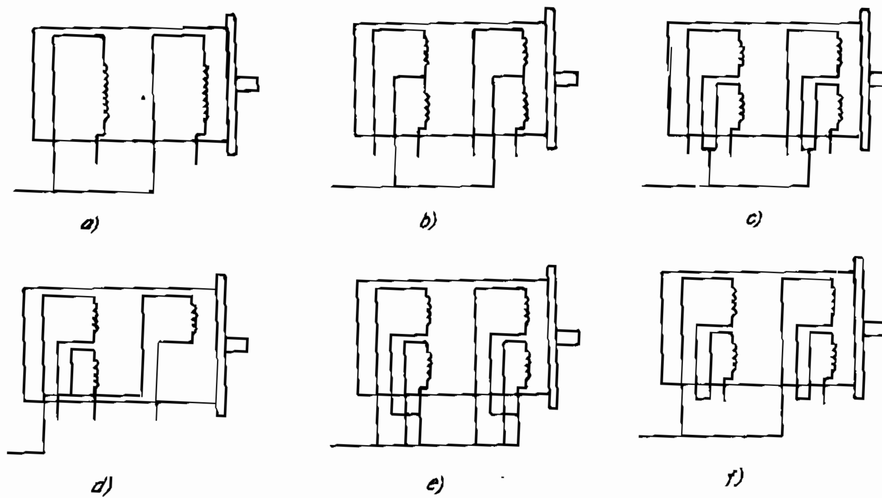
c/ 2 pha: 8 đầu dây　　d/ 3 pha: 4 đầu dây

e/ 4 pha: 8 đầu dây　　f/ 4 pha: 8 đầu dây (nối tiếp)

Roto có nhiều cực, còn gọi là răng. Số cực của roto phối hợp với số cực của stato xác định giá trị góc bước θ. Như biểu thức (10.22) có góc bước θ bằng 360^0 chia cho số bước s. Góc bước lớn nhất là 90^0 ứng với động cơ có 4 bước. Phần lớn những động cơ bước hiện nay có số bước s = 200, nên θ = $1{,}8^0$.

Số bước càng lớn, độ phân giải càng cao và định vị càng chính xác. Trong thực tế cũng không thể tăng số bước lên quá cao. Tuy nhiên, có thể dùng công nghệ tạo bước nhỏ để chia bước thành 2 nửa bước hoặc từ 10 đến 125 bước nhỏ. Để hiểu bản chất của công nghệ này, trở lại hình

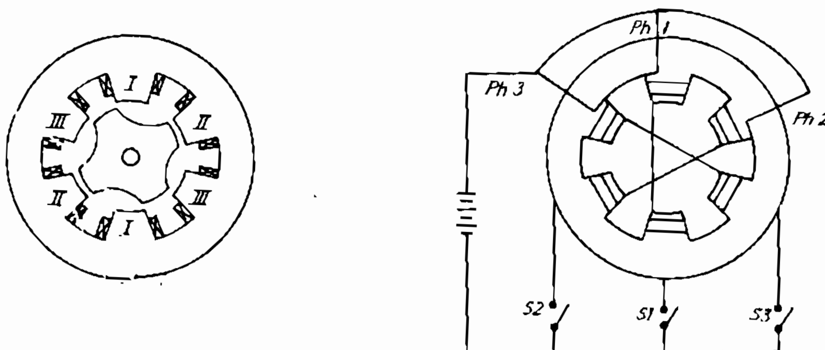
10.14, nhận thấy rằng có thể làm cho roto dừng lại ở nửa đường nếu cung cấp dòng điện như nhau cho cả 2 cuộn dây α và β. Công nghệ tạo bước nhỏ, đôi khi còn gọi là tạo vi bước, chỉ đơn giản là mở rộng phương pháp nói trên cho nhiều vị trí trung gian bằng cách cung cấp những giá trị dòng khác nhau cho mỗi cuộn dây. Kích thước bước nhỏ thường hay dùng nhất là 1/10, 1/16/ 1/32 và 1/125 của bước đầy. Ưu điểm hiển nhiên của bước nhỏ là có độ phân giải tinh hơn nhiều. Ví dụ, nếu có 125 bước nhỏ trong một bước với 200 bước trong một vòng quay thì độ phận giải là 200x125 = 25000 bước nhỏ trong một vòng quay.



Hình 10.15. *Pha của động cơ và các cách nối dây.*

Động cơ bước loại từ trở biến đổi (VR).

Roto của động cơ bước VR làm bằng sắt non có nhiều răng. Stato

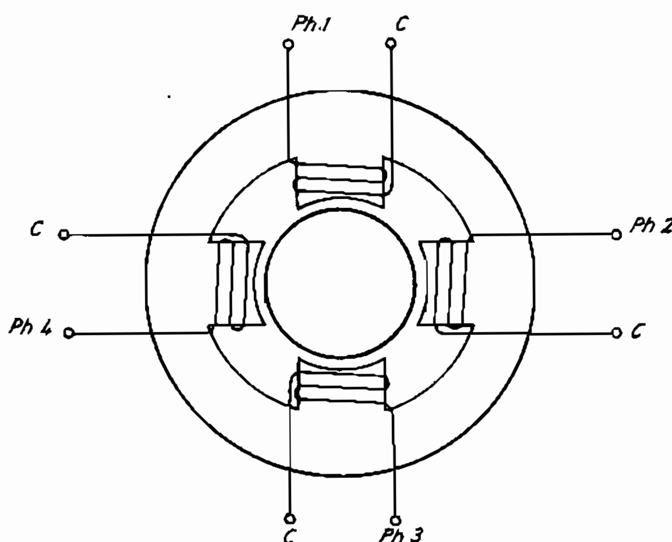


Hình 10.16. *Sơ đồ động cơ bước VR*

cũng có các răng cùng cuộn cảm (hình 10.16). Khi dòng điện chạy qua một cuộn cảm trên stato sinh ra một từ trường làm cho răng trên roto bị hút đứng thẳng hàng với răng tương ứng trên stato. Khi dòng điện được cấp sang một cuộn cảm khác, roto chuyển dịch một góc bước. Góc bước của động cơ VR thường là $7,5^0$ hoặc 15^0. Đặc điểm của động cơ bước VR là do roto sắt non có quán tính nhỏ hơn các loại khác, nên cho phép đáp ứng nhanh hơn. Tuy nhiên do roto không có từ trường nên không có mômen dư do đó khi ngừng kích thích động cơ sẽ còn quay tự do.

Động cơ bước nam châm vĩnh cửu (PM)

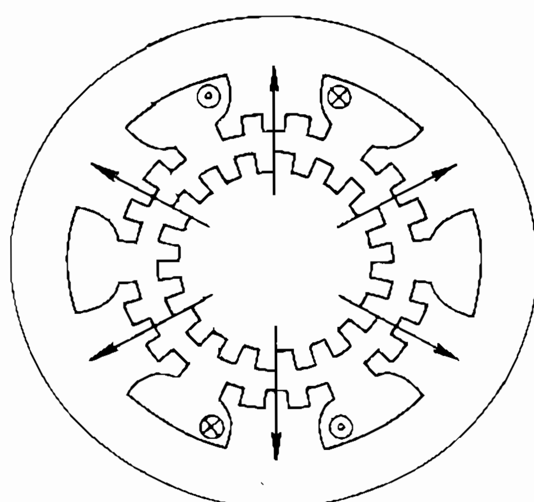
Động cơ bước PM có từ trường trong roto nên có mômen giữ khi động cơ không được kích hoạt. Mỗi răng của từ trường đều hướng trục cực tính là nam hoặc bắc. Trong kỹ thuật hiện đại roto được làm ở dạng đĩa mỏng bằng vật liệu từ tính đặc biệt. Đĩa được nhiễm từ tới 50 cặp cực nam - bắc xen kẽ nhau. Một số động cơ bước có từ trường được đưa vào stato để tăng từ trường và tạo ra mômen lớn hơn. Động cơ bước PM đòi hỏi ít năng lượng kích hoạt hơn các loại động cơ bước khác. Chúng còn có đặc tính tắt dao động tốt hơn. Góc bước của chúng bao gồm tất cả các góc bước chuẩn $1,8^0$; $7,5^0$; 15^0, 30^0; 45^0 và 90^0. Trên hình10.17 là sơ đồ động cơ bước PM 4 pha.



Hình 10.17. *Sơ đồ động cơ bước PM 4 pha.*

Động cơ bước kiểu lai (hybrid)

Động cơ bước kiểu lai kết hợp các đặc tính của động cơ bước VR và động cơ bước PM. Động cơ bước kiểu lai có nhiều răng roto hơn và mômen lớn hơn (hình10.18). Các góc bước thông dụng của động cơ bước kiểu lai là $0,9^0$ và $1,8^0$.



Hình 10.18. *Sơ đồ động cơ bước kiểu lai*

CHƯƠNG XI

TRUYỀN DẪN ĐỘNG THUỶ KHÍ

11.1. CÁC KHÁI NIỆM CƠ BẢN

Trong kỹ thuật người máy công nghiệp rất hay dùng các hệ thống truyền dẫn thuỷ lực hoặc khí nén. Trong các hệ thống này năng lượng được truyền đi bằng chất lỏng hoặc chất khí dưới tác dụng của áp lực tạo ra từ các nguồn máy bơm, máy nén.

Áp suất *p* của chất lỏng hoặc chất khí có thể hiểu như nội thế năng e_p trong một đơn vị thể tích. Thường dùng đơn vị đo là pascal (p_a) hoặc bar (1bar = 10^5 p_a).

Ngoài ra còn phần thế năng e_g phụ thuộc độ cao của chất lỏng hoặc chất khí dưới tác dụng của sức hút trọng trường. Tuy nhiên trong tay máy sự thay đổi độ cao này không lớn nên có thể bỏ qua e_g.

Mặt khác chất lỏng hoặc chất khí chuyển động trong hệ thống với vận tốc u tạo ra một động năng tính trên một đơn vị thể tích là $e_c = 1/2\rho u^2$ (ρ là mật độ).

Như vậy có thể xem xét hai nhóm phương pháp biến đổi năng lượng của chất lỏng hoặc của chất khí thành cơ năng: phương pháp tĩnh và phương pháp động.

Đối với các phương pháp động, đều được cho rằng, thế năng của chất lỏng hoặc chất khí thoạt đầu sẽ biến thành động năng tạo nên sự chuyển dịch với vận tốc nhanh dần. Do vậy tạo nên những hiệu ứng động lực, chẳng hạn như trong tuabin v.v...

Trong kỹ thuật người máy công nghiệp các cơ cấu thuỷ khí thường có các chuyển động không liên tục, vận tốc thấp và thường gia tăng những lực phanh hãm. Bởi vậy khi khảo sát các truyền động thuỷ khí trong tay máy thường dùng các phương pháp tĩnh.

Đối với các phương pháp tĩnh năng lượng được biến đổi trực tiếp từ thế năng của chất lỏng hoặc chất khí. Do vậy có thể tính lực F (hoặc mômen động M) của chất lỏng hoặc chất khí tác động lên phần động của cơ cấu, tỷ lệ với độ chênh lệch áp suất:

$$F = S\,(p_1 - p_2), \qquad (11.1)$$

$$M = C\,(p_1 - p_2), \qquad (11.2)$$

với S - diện tích; C - thể tích.

11.1.1. Các phương trình cơ bản ở chế độ làm việc bình ổn.

1. Quy luật bảo toàn khối lượng.

Theo quy luật này thì khối lượng chất lỏng hoặc chất khí chuyển qua các đoạn ống dẫn chỗ có diện tích S_1 với lưu lượng q_1 và chỗ có diện tích S_2 với lưu lượng q_2, đều như nhau, tức là:

$$\rho_1 q_1 = \rho_2 q_2$$

Bởi vì chất lỏng không nén được nên xem mật độ $\rho_1 = \rho_2 = const$. Do vậy, ta có

$$q_1 = q_2 \qquad (11.3)$$

Còn đối với chất khí, mật độ chất khí phụ thuộc vào áp suất, bởi thế:

$$q_1 \neq q_2$$

2. Quy luật bảo tồn năng lượng.

Theo quy luật này đối với chất lỏng lý tưởng không nén được thì trên mỗi đoạn của hệ thuỷ lực (nếu ở đấy không có nguồn bổ sung thêm hoặc lối thất thoát đi) đều có giá trị năng lượng ứng với một đơn vị thể tích là không đổi (phương trình Bernoulli).

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho u_1^2 = p_2 + \frac{1}{2}\rho u_2^2$$

hoặc là:

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho(\frac{q_1^2}{s_1^2}) = p_2 + \frac{1}{2}\rho(\frac{q_2^2}{s_2^2}) \qquad (11.4)$$

Đối với môi trường chất nén được, nhưng nếu chênh lệch áp suất gây ra lực nội ma sát là không đáng kể, thì có thể sử dụng phương trình trên như phép tính gần đúng.

3. Tổn thất năng lượng.

Trong thực tế năng lượng của dòng chất lỏng hoặc chất khí không được bảo tồn hoàn toàn vì có tổn thất dọc đường đi hoặc do ma sát với thành ống, hoặc do thay đổi dòng chảy v.v... Năng lượng tổn thất Δp trên mỗi đoạn ống dẫn có tiết diện không đổi phụ thuộc vào đặc tính của dòng chảy:

Khi *chảy tầng* các đường dòng đều song song với thành ống. Tuy nhiên chất lỏng thực tế có độ nhớt (đặc trưng bằng hệ số nhớt μ) cho nên khi chuyển động có xuất hiện lực nội ma sát giữa các lớp chất lỏng hoặc với thành ống. Bởi vậy sự phân bố vận tốc các dòng chảy là không đều, lớn nhất ở chính giữa ống giảm dần ở sát thành ống. Đồng thời cũng do lực ma sát đó mà một phần năng lượng biến thành nhiệt. Năng lượng tổn thất này tỉ lệ thuận với lưu lượng:

$$\Delta p = Rq \qquad (11.5)$$

Ví dụ, đối với ống dẫn hình trụ chiều dài L thì:

$$R = 32\,\pi\mu\left(\frac{L}{S^2}\right)$$

Khi *chảy rối* thì các đường dòng không còn song song với thành ống nữa mà có thể phân bố lung tung xung quanh một đường trục trung bình nào đó với vận tốc u. Sự va chạm giữa các phần tử chất lỏng (hoặc chất khí) với nhau hoặc với thành ống sẽ sinh nhiệt và làm mất mát năng lượng. Năng lượng tổn thất này không phụ thuộc vào hệ số nhớt μ mà xác định bởi động năng của dòng chảy.

$$\Delta p = \frac{1}{2}\xi\rho\left(\frac{q^2}{s^2}\right) = rq^2 \qquad (11.6)$$

với ξ - hệ số không thứ nguyên.

Việc chuyển từ chảy tầng sang chảy rối sẽ xảy ra khi lưu lượng q vượt quá một giá trị q^*, ứng với một đại lượng R_e không thứ nguyên nào đó, R_e gọi là số Reynolds. Đối với ống dẫn hình trụ đường kính D:

$$R_e = \frac{4\rho q}{\pi D \mu}$$

11.1.2. Các phương trình cơ bản ở chế độ làm việc chuyển tiếp.

1. *Phương trình trạng thái khí.*

$$\frac{p}{\rho^k} = \text{const} \qquad 1 \le k \le y$$

Phương trình đặc trưng trạng thái nhiệt động học của chất khí là phương trình liên hệ giữa mật độ ρ và áp suất p.

Trường hợp k = 1 quá trình là đẳng nhiệt. Khi chất khí chuyển từ trạng thái này sang trạng thái khác một cách chậm chạp thì quá trình trao đổi nhiệt với môi trường hoàn toàn thực hiện được và nhiệt độ của chất khí xem như không đổi. Việc chuyển tiếp đó ứng với định luật Boyle - Mariotte:

$$\frac{P}{\rho} = RT$$

Trường hợp k = γ quá trình là đoạn nhiệt. Khi chất khí chuyển trạng thái tương đối nhanh thì quá trình trao đổi nhiệt với môi trường hầu như không cảm thấy. Việc chuyển tiếp đó ứng với định luật Laplace:

$$\frac{P}{\rho^{\gamma}} = \text{const}$$

Đối với khí nén $\gamma \cong 1,404$.

Từ trường hợp chung có thể viết:

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{\rho}{p.k}\frac{dp}{dt} \qquad (11.7)$$

2. Phương trình lưu lượng

Khảo sát một bình chứa có thể tích V, chịu áp suất đồng nhất p. Gọi q_1 và q_2 là lưu lượng ở đầu vào và đầu ra. Điều kiện bảo tồn khối lượng bên trong bình giữa hai thời điểm t và t + dt có thể biểu diễn dưới dạng:

$$\rho q_1 dt - \rho q_2 dt = d(\rho V) = V d\rho$$

Từ đó:

$$q_1 - q_2 = \frac{V}{\rho}\frac{d\rho}{dt}$$

thay (11.7) vào vế phải phương trình ta có:

$$q_1 - q_2 = \frac{V}{p.k}\frac{dp}{dt} \qquad (11.8)$$

Ở chế độ làm việc bình ổn vế phải của biểu thức (11.8) sẽ bằng không.

3. Độ chịu nén của chất lỏng

Chất lỏng có thể xem như một môi trường không nén được. Tuy nhiên ở nhiệt độ và áp suất nào đó thì mật độ của chất lỏng thay đổi. Có thể đánh giá độ chịu nén của chất lỏng bằng hệ số nén thể tích β, đặc trưng cho sự thay đổi thể tích tương đối khi áp lực biến đổi một đại lượng dp:

$$\beta = \frac{1}{V}\frac{dV}{dp}$$

Vì khi thể tích thay đổi một đại lượng dV thì mật độ ρ cũng thay đổi một đại lượng dρ:

$$\frac{dV}{V} = \frac{d\rho}{\rho}$$

Gọi môđun chịu nén B là số nghịch đảo của β:

$$B = \frac{\rho\, dp}{d\rho}$$

Như vậy thứ nguyên của B trùng với thứ nguyên của áp suất. Thường thường B ≈ 1500MPa. Khi áp suất tăng thì B tăng chậm, còn khi nhiệt độ tăng thì B giảm. Đặc biệt B phụ thuộc vào lượng khí lẫn vào chất lỏng.

Trong trường hợp này phương trình lưu lượng có dạng:

$$q_1 - q_2 = \frac{V}{B}\frac{dp}{dt} \qquad (11.9)$$

4. Ảnh hưởng do thay đổi hình học

Xét phương trình lưu lượng khi thể tích V thay đổi theo thời gian. Ví dụ, thay đổi thể tích chứa trong xilanh do vị trí của piston hoặc trong ống xếp do sự đàn hồi của ống v.v... Trong các trường hợp đó thì:

$$d(\rho V) = V d\rho + \rho dV$$

Khi đó thay thế cho biểu thức (11.8) ta có:

$$q_1 - q_2 = \frac{V}{\rho}\frac{d\rho}{dt} + \frac{dV}{dt} \qquad (11.10)$$

Gọi $q_d = \frac{dV}{dt}$ là lưu lượng biến dạng. Trong đa số trường hợp thể tích các loại xilanh có quan hệ tuyến tính với độ dịch chuyển dài hoặc dịch chuyển góc θ.

$$V = S(x_o + x),$$

hoặc

$$V = C(\theta_o + \theta).$$

Do vậy:

$$q_d = S\frac{dx}{dt} \tag{11.11}$$

hoặc:

$$q_d = C\frac{d\theta}{dt} \tag{11.12}$$

Từ (11.1), (11.11) và (11.2), (11.12) ta có:

$$(p_1 - p_2)q_d = F\frac{dx}{dt} \tag{11.13}$$

$$(p_1 - p_2)q_d = M\frac{d\theta}{dt} \tag{11.14}$$

11.2. TRUYỀN DẪN ĐỘNG KHÍ NÉN

11.2.1. Đặc điểm chung.

Dùng khí nén trong hệ truyền dẫn động robot có nhiều thuận lợi. Trước hết do các phân xưởng công nghiệp thường có mạng lưới khí nén chung, cho nên đơn giản hoá được phần thiết bị nguồn động lực cho robot. Vì khí nén có thể xả ra không khí nên không đòi hỏi hệ thống đưa khí nén trở lại như đối với dầu ép. Hệ thống truyền dẫn khí nén tương đối gọn nhẹ, dễ sử dụng, dễ đảo chiều và không quá nhạy với nhiệt độ khi làm việc.

Tuy nhiên, dùng hệ truyền dẫn khí nén cũng không ít nhược điểm. Trước hết là do đặc điểm nén được của chất khí cho nên chuyển động do chúng thực hiện thường kèm theo dao động, không chính xác lúc dừng,nhất là ở các vị trí trung gian. Ngoài ra còn cần có biện pháp phun dầu bôi trơn, lọc bụi, lọc ẩm và giảm ồn.

Môdun truyền dẫn động khí nén cho một bậc tự do của cơ cấu tay máy thường bao gồm các bộ phận chủ yếu như động cơ, bộ phận phân

phối, bộ phận điều chỉnh vận tốc. Các phần tử và thiết bị khí nén đều được tiêu chuẩn hoá. Bảng dưới đây giới thiệu các phần tư, thiết bị chủ yếu của hệ thống truyền dẫn động khí nén và các ký hiệu cơ bản. Ngày nay đã có những chương trình máy tính vẽ các phần tử và các mạch khí nén. Dưới đây ta sử dụng các chương trình đó.

11.2.2. Các bảng ký hiệu và tên gọi các phần tử và thiết bị khí nén

Bảng 11.1. *Các thiết bị chuyển hóa năng lượng*

N°	Tên phần tử và thiết bị	Sơ đồ
1	Máy nén khí	
2	Bơm chân không	
3	Động cơ khí nén tốc độ không đổi với một dòng khí	
4	Động cơ khí nén tốc độ không đổi đối với hai dòng khí	
5	Động cơ khí nén với thể tích chuyển dịch điều chỉnh được một dòng khí	

tiếp bảng 11.1

N°	Tên phần tử và thiết bị	Sơ đồ
6	Động cơ khí nén với thể tích chuyển dịch điều chỉnh được hai dòng khí	
7	Xilanh tác động đơn, chuyển động lùi nhờ lực bên ngoài.	
8	Xilanh tác động đơn, chuyển động lùi nhờ lò xo	
9	Xilanh tác động kép với piston một đầu cần	
10	Xilanh tác động kép với piston hai đầu cần	
11	Xilanh vi sai với piston một đầu cần	
12	Xilanh tác động kép hai đầu có gối đệm điều chỉnh được	

Bảng 11.2. *Các thiết bị điều chỉnh năng lượng*

N°	*Các van điều khiển hướng*	*Sơ đồ*
1	Van dẫn hướng 2/2 thường đóng	A P
2	Van dẫn hướng 2/2 thường mở	A P
3	Van dẫn hướng 3/2 thường đóng	A P R
4	Van dẫn hướng 3/2 thường mở	A P R
5	Van dẫn hướng 3/ 3 ở vị trí giữa đóng	A P R
6	Van dẫn hướng 4/2	B A P R
7	Van dẫn hướng 4/3 vị trí giữa đóng	B A P R

N°	*Các van điều khiển hướng*	*Sơ đồ*
8	Van dẫn hướng 4/3 vị trí thả nổi	
9	Van dẫn hướng 5/2	
10	Van dẫn hướng 5/3 vị trí giữa đóng	

N°	*Van một chiều:*	Sơ đồ
1	Van khoá không lò xo	
2	Van khoá có lò xo	
3	Van khoá phụ trợ	
4	Van con thoi	
5	Van xả nhanh	

Tiếp bảng 11.2

N°	*Van điều áp*	Sơ đồ
1	Van khống chế áp, điều chỉnh được	P R
2	Van đặt nối tiếp, điều chỉnh được, có lỗ xả	A X P
3	Van chỉnh áp không lỗ xả, điều chỉnh được	P A
4	Van chỉnh áp, có lỗ xả, điều chỉnh được	F R A

N°	*Van tiết lưu*	Sơ đồ
1	Van tiết lưu với mức khống chế không đổi	
2	Van màng với mức khống chế không đổi	
3	Van tiết lưu điều chỉnh được, tác động bất kì	
4	Van tiết lưu điều chỉnh được, tác động cơ học chống lại lò xo tự hồi	

Tiếp bảng 1.1.2

N^0	*Van đóng kín (Van khoá)*	*Sơ đồ*
1	Van đóng kín, biểu diễn đơn giản hoá	
N^0	Van tiết lưu với van khoá mắc song song	Sơ đồ
1	Van tràn điều chỉnh được	
2	Van màng tràn, điều chỉnh được	
N^0	*Nguồn truyền năng lượng:*	*Sơ đồ*
1	Nguồn áp suất	
2	Đường làm việc	
3	Đường điều khiển	
4	Ống dẫn mềm	
5	Đường điện	
6	Điểm nối (cố định)	
7	Các đường giao nhau	
8	Điểm xả	
9	Lỗ ra không nối ống dẫn	

Tiếp bảng 11.2

N^0	*Nguồn truyền năng lượng*	*Sơ đồ*
10	Lỗ ra có nối ống dẫn	
11	Điểm tiếp nối với áp suất đã đóng	
12	Điểm tiếp nối với áp suất có đường nối	
13	Khớp nối ngắt nhanh, đã tách, van đóng kín ống dẫn.	
14	Khớp nối ngắt nhanh đã tách, ống dẫn đóng	
15	Thiết bị giảm âm	
16	Bình tích khí	
17	Bộ lọc	
18	Bộ phân ly nước thao tác bằng tay	
19	Bộ phân ly nước thoát nước tự động	

Tiếp bảng 11.2

N^o	*Nguồn truyền năng lượng*	*Sơ đồ*
20	Bộ lọc, phân li nước tự động	
21	Thiết bị sấy	
22	Thiết bị bôi trơn	
23	Thiết bị phụ trợ (bộ lọc, van chỉnh áp, thiết bị bôi trơn, áp kế) biểu diễn đơn giản hoá	
24	Thiết bị làm mát	

Bảng 11.3. *Các phương tiện tác động*

N^o	*Thiết bị điều khiển bằng tay, chân*	*Ký hiệu*
1	Chuông	
2	Nút bấm	
3	Tay cầm	
4	Bàn đạp	

Tiếp bảng 11.3

N⁰	*Điều khiển cơ*	Ký hiệu
1	Con trượt	
2	Lò xo	
3	Cần con lăn	
4	Cần con lăn tự hồi	
N⁰	*Điều khiển điện*	Ký hiệu
1	Ống dây 1 cuộn tác dụng	
2	Ống dây 2 cuộn tác dụng ngược chiều	
N⁰	*Điều khiển khí nén*	*Ký hiệu*
1	Trực tiếp bằng tràn áp	
2	Trực tiếp bằng tràn áp	
3	Gián tiếp bằng cấp áp	

Tiếp bảng 11.3

N^0	*Điều khiển khí nén*	*Ký hiệu*
4	Gián tiếp bằng tràn áp	
N^0	*Điều khiển kết hợp*	*Ký hiệu*
1	Ống dây và van điều khiển	
2	Ống dây hoặc van điều khiển	
3	Ống dây hoặc van điều khiển bằng tay có lò xo tự hồi	
N^0	*Các ống nối*	*Ký hiệu*
1	Các đường làm việc	A, B, C ....
2	Đường tiếp khí, tiếp nối khí nén	P R, S, T ...
3	Điểm thải, xả	L
4	Đường điều khiển	Z, Y, X ...

11.2.3. Tính toán và chọn lựa xilanh khí nén.

Khi thiết kế hệ thống truyền dẫn động khí nén thì xilanh là phần tử cần phải tính toán nhất. Gọi chung tên gọi là xilanh cho cả 2 trường hợp năng lượng khí nén được chuyển thành chuyển động tịnh tiến hoặc chuyển động quay. Trường hợp thứ 2 còn gọi là xilanh quay hoặc động cơ khí nén (pneumatic motor).

Trong bảng 11.1 có loại xilanh tác động đơn (single acting cylinder) và xilanh tác động kép (double acting cylinder).

Trong các *xilanh tác động đơn*, khí nén vào một phía đẩy piston theo chiều ngược lại, trở về vị trí ban đầu với tốc độ đủ nhanh. Hành trình của piston phải nhỏ hơn hoặc bằng chiều dài của lò xo khi chưa bị nén. Các xilanh đơn cũng có nhiều kiểu khác nhau tuỳ theo công dụng. Các loại xilanh đơn dùng chủ yếu kẹp, phun, nén, nâng và cấp liệu v.v... Lớp vật liệu phủ ngoài piston, ví dụ như tefton, đảm bảo vừa kín khít, vừa ít ma sat và lâu mòn.

Trong các *xilanh tác động kép*, khí nén có thể đẩy piston chuyển động tịnh tiến và cả chuyển động lùi. Hành trình piston không bị hạn chế nhưng phải tính tới tốc độ uốn võng của cần piston.

Xilanh tác động kép có loại piston với 1 đầu cần hoặc 2 đầu cần. Loại 2 đầu cần là loại cần piston kéo dài cả 2 phải chạy dọc suốt chiều dài xilanh.

Loại này có nhiều ưu điểm như:

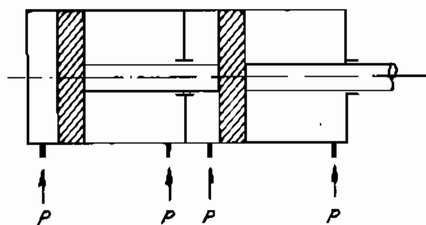
- Lực tác động bằng nhau ở cả 2 chiều chuyển động vì diện tích hữu ích của piston ở 2 phía đều như nhau;

- Có thể chịu được tải ngang nhỏ vì cần piston xem như một trục lắp trên 2 ổ tựa.

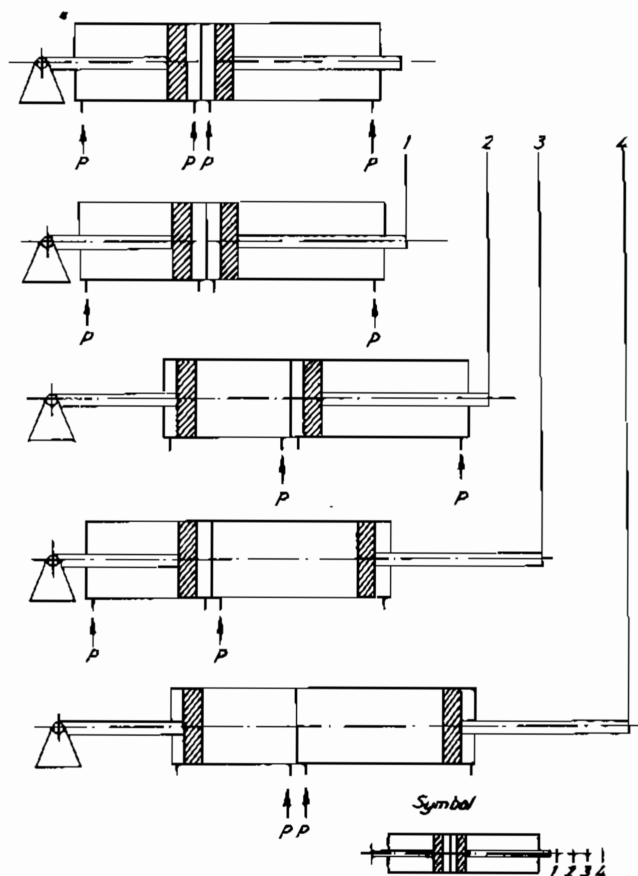
Xilanh tác động kép thường có kết cấu *2 đầu có giảm chấn điều chỉnh được*. Để tránh va chạm mạnh, nhất là khi dịch chuyển khối lượng lớn, người ta tạo ra những cái đệm ở vị trí cuối hành trình. Khi đến vị trí cuối, piston đệm chặn đường ra của khí nén và thay vào đó có một lỗ thoát rất nhỏ điều chỉnh được. Khí nén ở phần cuối xilanh được nén và thoát ra từ từ qua van tiết lưu một chiều. Vì thế piston chuyển động từ từ đến vị trí tận cùng.

Có loại xilanh tiếp đôi và xilanh nhiều vị trí.

Cơ cấu *xilanh tiếp đôi* gồm 2 xilanh tác động kép, ghép nối tiếp nhau tạo thành như một khối duy nhất. Khi tác động đồng thời thì lực trên cần piston tăng gấp đôi. Người ta dùng loại xilanh này khi cần lực lớn mà đường kính xilanh bị giới hạn. Hình 10.1 là sơ đồ cơ cấu xilanh tiếp đôi.



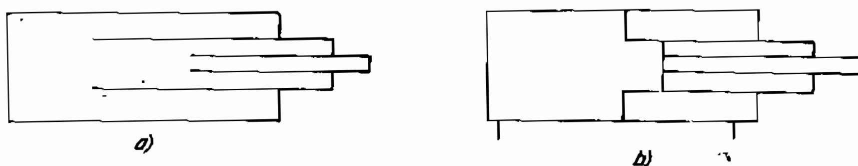
Hình 11.1.
Xilanh tiếp đôi



Hình 11.2. *Xilanh nhiều vị trí*

Xilanh nhiều vị trí gồm 2 hoặc nhiều xilanh tác động kép ghép nối tiếp nhau. Tuỳ theo từng xilanh hoạt động riêng rẽ mà tổ hợp chúng sẽ đạt được nhiều vị trí khác nhau. Với 2 xilanh, như hình 11.2, có 4 vị trí khác nhau. Loại xilanh nhiều vị trí thường được dùng để phục vụ các cơ cấu phân loại sản phẩm. Ở mỗi vị trí ứng với mỗi loại sản phẩm.

Để thực hiện nhiều vị trí còn có thể dùng các xilanh lồng tác động đơn (hình 11.3a) hoặc tác động kép (hình 11.3b). Chúng có kết cấu như là các xilanh lồng vào nhau.



Hình 11.3. *Các xilanh lồng.*

Các *xilanh quay* có sơ đồ kết cấu tương tự như một roto cánh gạt nằm trong một thân hộp kín. Khí nén đưa vào trong thân hộp làm roto quay.

Chuyển động quay có thể tạo ra từ các xilanh tịnh tiến tác động kép. Trong trường hợp này trên một đầu hoặc một đoạn cần piston được tạo hình như thanh răng hoặc trục vít, ăn khớp với bánh răng hoặc bánh vít. Góc quay có thể thay đổi theo thông số ăn khớp bánh răng. Thường dùng các góc quay 45^0, 90^0, 180^0, 270^0 đến 720^0. Loại này được dùng trong các khớp quay của robot, trong cơ cấu đóng mở van v.v...

Tính toán lực piston

Lực tác động vào piston phụ thuộc vào áp suất khí nén, đường kính trong của xilanh và ma sát ở các bộ phận tiếp xúc động:

$$F_L = A.p \tag{11.15}$$

với F_L - lực piston lý thuyết (N)

A - diện tích hữu ích của piston (m^2)

p - áp suất làm việc (Pa)

Trong thực tế còn có lực ma sát nên lực piston hiệu dụng F_n sẽ là:

- Đối với xilanh tác động đơn:

$$F_n = A.p - (F_r + F_l). \tag{11.16}$$

- Đối với xilanh tác động kép:

Khi tiến: $$F_n = A.p - F_r \tag{11.17}$$

Khi lùi: $$F_n = A'.p - F_r \tag{11.18}$$

Trong các công thức trên:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (m^2)$$

$$A' = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} \quad (m^2)$$

F_r - lực lò xo phản hồi (N)

F_f - lực ma sát (N), thường $F_f = (3\% \div 20\%) F_L$

D - đường kính trong của xilanh (m)

d - đường kính của cần piston (m)

Vận tốc của piston

Vận tốc di chuyển của piston là hàm của áp suất khí tác động lên bề mặt piston, lực cản do ma sát giữa piston và mặt trụ trong xilanh và sự giảm chấn cuối hành trình v.v... Vận tốc piston thường thay đổi từ 0,1 đến 1,5m/s.

Tính lưu lượng khí

Có thể dùng các giản đồ lập sẵn của hãng sản xuất để tính lưu lượng khí, hoặc tính theo các công thức sau:

- Đối với xilanh tác động đơn:

$$Q = S.n.\frac{d^2\pi}{4}.K_p, \qquad (11.19)$$

- Đối với xilanh tác động kép:

$$Q = S.n.\pi(\frac{D^2}{4} + \frac{D^2 - d^2}{4}).K_p \qquad (11.20)$$

Trong đó:

Q - lưu lượng khí (l/phút)

S - hành trình piston (cm)

n - số hành trình trong 1 phút

K_p - tỷ số nén

Tỷ số nén được tính theo công thức sau:

$$K_p = \frac{101,3 + \text{áp suất cung cấp (KPa)}}{101,3}$$

11.2.4. Sơ đồ và phương pháp cấu tạo mạch khí nén.

Người ta dùng 2 phương pháp cấu tạo sơ đồ mạch khí nén:

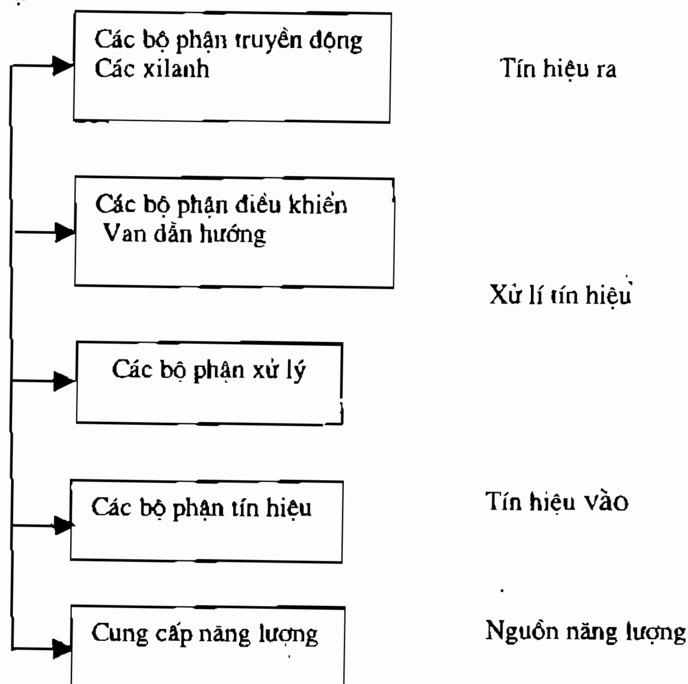
Theo phương pháp thứ nhất các sơ đồ mạch khí nén được cấu tạo chủ yếu dựa trên cơ sở kinh nghiệm với trực giác của người thiết kế. Phương pháp này đòi hỏi tích luỹ kinh nghiệm, phân tích mức độ phù hợp của những sơ đồ tương tự trước đây mà quyết định giải pháp. Trong trường hợp này ảnh hưởng chủ quan của người thiết kế thường không nhỏ. Tuy nhiên trong thực tế đôi khi các giải pháp như thế là cần thiết và phương pháp này vẫn được áp dụng như một phương pháp truyền thống.

Theo phương pháp thứ hai, còn gọi là phương pháp "hệ thống tầng" sơ đồ được cấu tạo từ các mạch cơ bản một cách lôgic. Chỉ khi nào các mạch cơ bản đảm bảo chức năng hoạt động thì mới xem xét đến các yêu cầu khác. Những yêu cầu này được xem xét kết hợp với nhau và sơ đồ mở rộng từng bước một.

Bố trí sơ đồ mạch

Theo thông lệ bộ phận cung cấp năng lượng được vẽ ở phía dưới và dòng năng lượng được phân bố từ dưới lên. Các phần tử, các van dẫn hướng và cả xilanh đều vẽ ở tư thế nằm ngang.

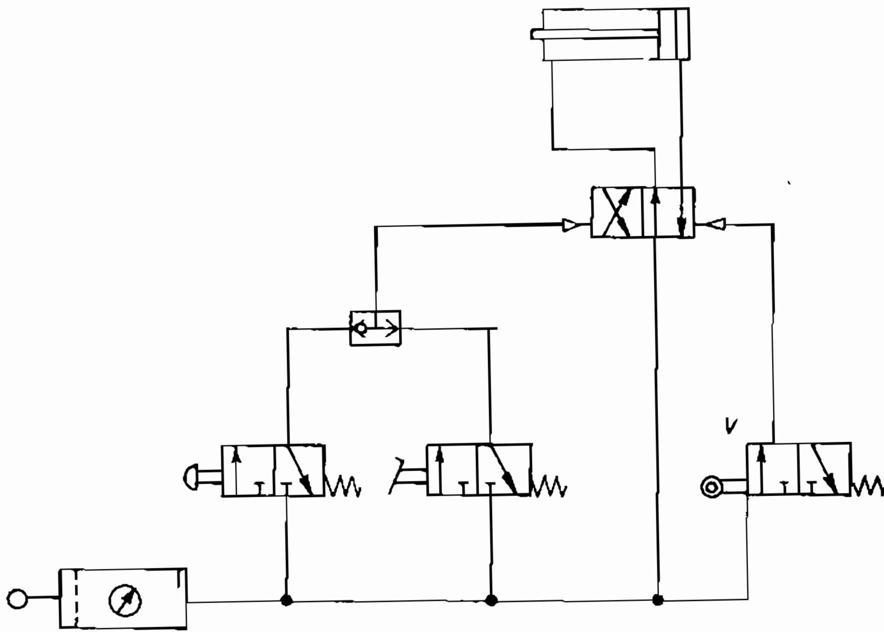
Trên hình 11.4 biểu thị sự phân bố từ dưới lên trên:



Hình 11.4. *Cách bố trí sơ đồ mạch*

Trên hình 11.5 là một sơ đồ mạch khí nén theo cách bố trí nói trên. ở đây người ta yêu cầu là khi ấn nút bấm hoặc bàn đạp thì cần piston sẽ chuyển dịch sang trái đến vị trí tận cùng tác động lên van V_1 đặt ở đó sẽ làm nó trở lại vị trí xuất phát.

Tuy nhiên trên thực tế V_1 đặt ở vị trí tận cùng khi đầu cần piston van chuyển dịch tới nhưng trên sơ đồ lại bố trí ở hàng các cổ tín hiệu.



Hình 11.5. *Sơ đồ mạch khí nén*

Các ký hiệu

Có thể ký hiệu các phần tử của hệ thống sơ đồ bằng chữ số:

Ký hiệu các nhóm:

Nhóm 0- nhóm năng lượng

Nhóm 1, 2, 3 ... đối với mỗi xilanh là một nhóm số.

Ký hiệu các nhánh:

0- các bộ phận trên nhánh đường làm việc.

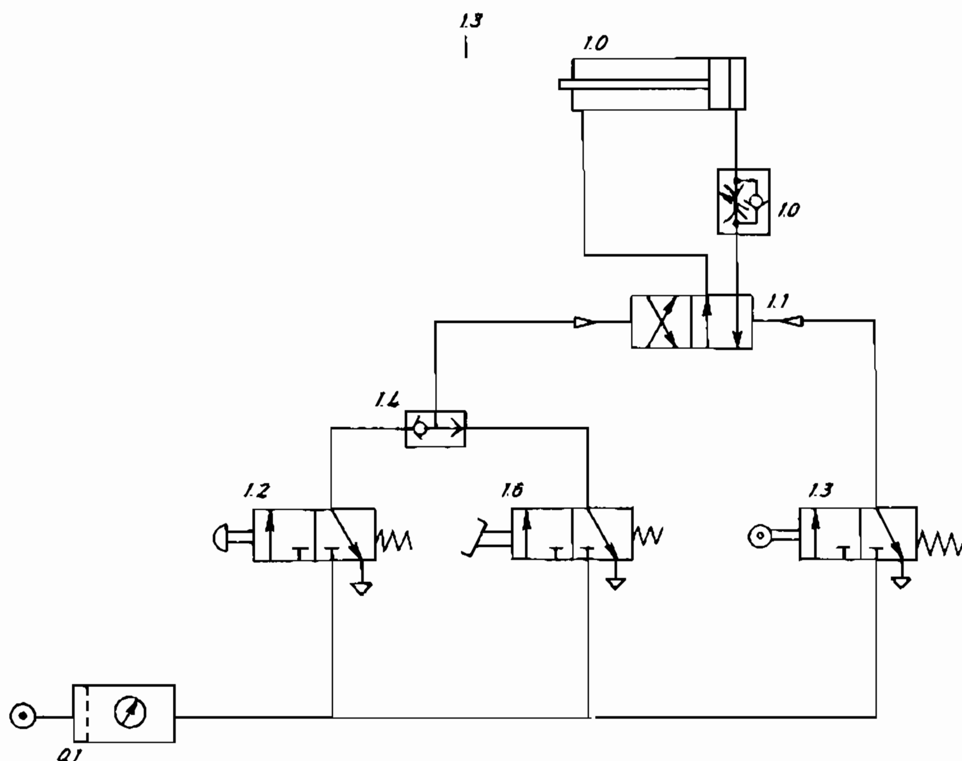
1- các bộ phận trên nhánh đường điều khiển.

2, 4 (số chẵn) - các bộ phận trên nhánh đường làm chuyển dịch piston về phía trước.

3, 5 (số lẻ) - các bộ phận trên nhánh đường làm chuyển dịch piston về phía ngược lại.

01, 02 .v...v. - các bộ phận khác nhau trên nhánh đường làm việc.

Hình 11.6 minh hoạ cách kí hiệu bằng chữ số trên một sơ đồ mạch khí nén.



Hình 11.6. *Ký hiệu bằng chữ số trên sơ đồ mạch*

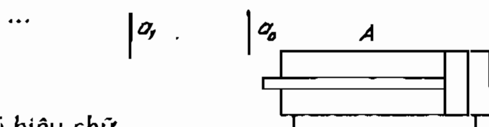
Có thể ký hiệu bằng các chữ cái kết hợp với chữ số:

Các xilanh truyền động được ký hiệu bằng chữ in hoa, các bộ phận tín hiệu được ghi bằng chữ thường, ví dụ, hình 11.7.

A, B. C, ... định danh cho các xilanh.

a_0, b_0, c_0, ... định danh các công tắc hành trình ứng với các vị trí đầu của các xilanh A, B, C ...

a_1, b_1, c_1, ... định danh của các công tắc hành trình ứng với các vị trí xác định của đầu cần piston của các xilanh A, B, C ...



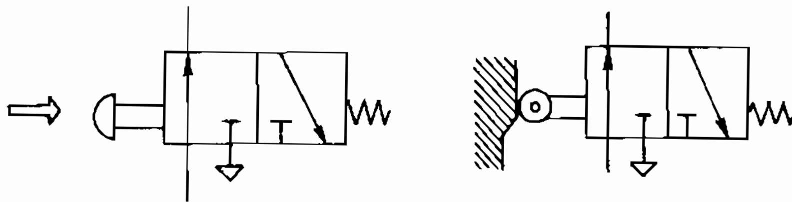
Hình 11.7. *Ký hiệu chữ*

Vẽ các đường làm việc bằng nét liền, còn các đường điều khiển bằng nét đứt.

Các thiết bị trong sơ đồ mạch thường được biểu thị ở vị trí khởi động điều khiển. Nếu không, phải có ghi chú thích hợp.

Trong các van có thể hồi đảo (ví dụ, bằng lò xo) thì *vị trí thường* được định nghĩa là vị trí ứng với phần động lúc van không được ghép nối. Còn vị trí ban đầu là vị trí ứng với phần động khi đã ghép nối với nguồn năng lượng.

Trên hình 11.8 biểu thị một van 3/2 tác động bằng nút bấm và một công tắc hành trình ở vị trí thường, được vẽ ở vị trí khởi động.



Hình 11.8. *Van 3/2 và công tắc hành trình.*

11.2.5. Các mạch khí nén cơ bản.

Phần trên đã nói tới sự đa dạng trong các phương cách thiết kế sơ đồ mạch khí nén. Tuy nhiên chúng có những điểm chung, ví dụ, đều gồm các mạch cơ bản và từ các mạch cơ bản có thể cấu tạo nên nhiều sơ đồ khí nén khác nhau.

Dưới đây sẽ khảo sát các mạch cơ bản dưới dạng các bài tập riêng lẻ.

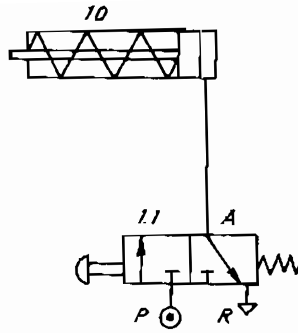
Điều khiển xilanh tác động đơn

Nhiệm vụ:

Cần chuyển dịch piston của một xilanh tác động đơn . Khi không có tác động nữa thì piston trở lại ngay vị trí ban đầu.

Giải:

Dùng một van dẫn hướng 3/2 thường đóng (hình 11.9). Khi van này được tác động, khí nén chạy từ P đến A và ống xả R bị đóng kín. Việc hồi đảo bằng lò xo làm cho buồng xilanh xả khí từ A đến R và lúc này cửa P lại bị đóng.

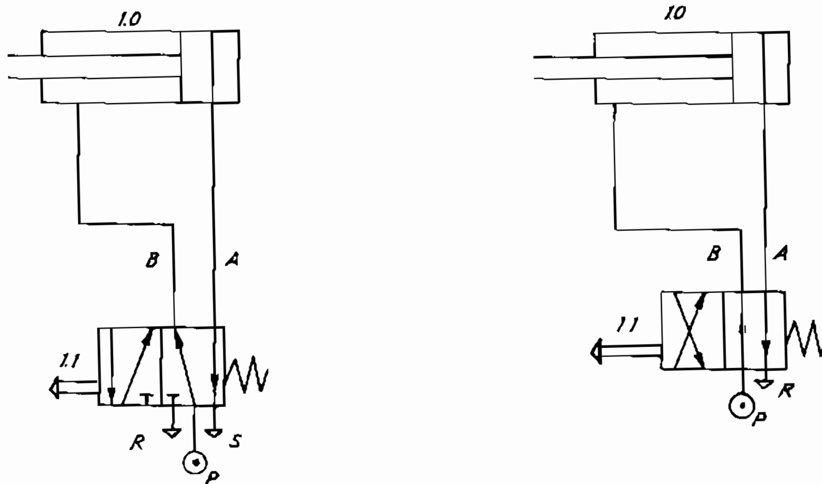


Hình 11.9. *Điều khiển xilanh tác động đơn*

Điều khiển xilanh tác động kép

Nhiệm vụ:

Piston của một xilanh tác động kép cần chuyển dịch đi và chuyển dịch lại.



Hình 11.10. *Điều khiển xilanh tác động kép.*

Giải:

Nhiệm vụ có thể thực hiện được bằng van dẫn hướng 4/2 hoặc van dẫn hướng 5/2 (hình 11.10).

Piston đang ở vị trí tận cùng phía sau, lúc đó khí thông từ P đến B và từ A đến R trong van dẫn hướng 4/2.

Khi tác động vào nút bấm của van, phần động chuyển dịch tới vị trí làm thông đường khí từ P đến A và từ B đến R. Vị trí piston sẽ được chuyển dịch lên phía trước đến vị trí tận cùng.

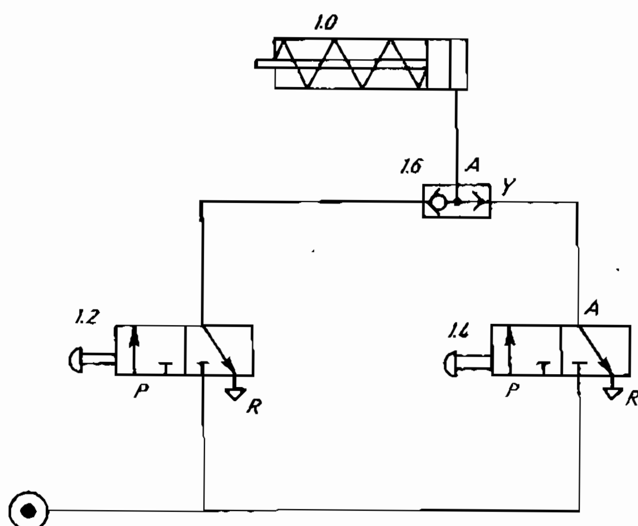
Thôi tác động vào nút bấm, lò xo tự hồi làm cho piston trở về vị trí ban đầu.

Với van dẫn hướng 5/2, khí xả lúc qua cửa R, lúc qua cửa S.

Điều khiển dùng van con thoi

Nhiệm vụ:

Tạo sự chuyển dịch của piston xilanh được tác động từ 2 điểm khác nhau (hình 11.11).



Hình 11.11. *Điều khiển dùng van con thoi.*

Giải:

Khi tác động lên van 1.2 khí nén đi từ P đến A và cũng đi từ X đến A trong van con thoi rồi đến xilanh. Quá trình này cũng diễn ra tương tự khi tác động lên van 1.4.

Nếu không dùng van con thoi thì khí có thể lọt ra ngoài qua lỗ xả của van hồi dẫn 3/2 khác, ví dụ, van 1.2 hoặc van 1.4 khi nó hoạt động.

Điều chỉnh tốc độ trên xilanh tác động đơn:

Nhiệm vụ:

Tốc độ của piston trong xilanh tác động đơn cần được điều chỉnh khi piston chuyển động tiến.

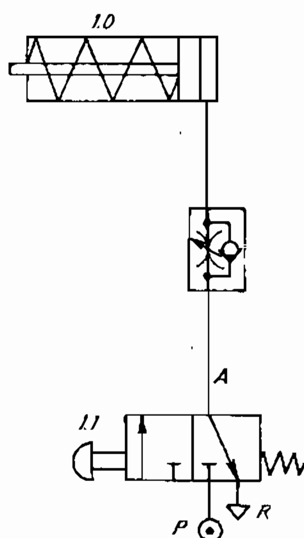
Giải:

Với xilanh tác động đơn chuyển động tịnh tiến của piston chỉ có thể giảm bằng cách dùng tiết lưu để cấp thêm hoặc giảm bớt luồng khí cung cấp.

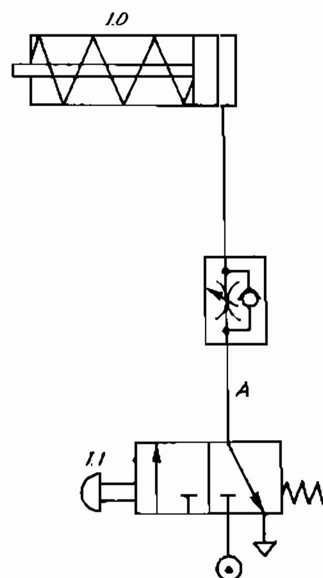
Hình 11.12 biểu thị tiết lưu khí nén cung cấp cho chuyển động tịnh tiến của piston.

Nhiệm vụ:

Tốc độ của piston cần được điều chỉnh khi lùi.



Hình 11.12. *Điều chỉnh tốc độ khi tiến*



Hình 11.13. *Điều chỉnh tốc độ khi lùi*

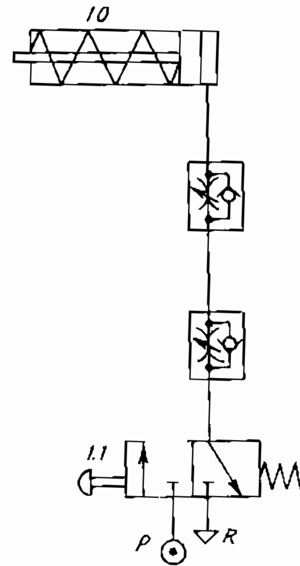
Giải:

Chỉ có thể thực hiện được bằng cách điều tiết xả khí (hình 11.13).

Nhiệm vụ:

Tốc độ của piston trong xilanh tác động đơn điều chỉnh và được tiết lưu riêng rẽ trong chuyển động tiến và lùi.

Giải: Trong trường hợp này cần sử dụng 2 van tràn để thực hiện việc điều chỉnh riêng rẽ và chính xác (hình 11.14).



Hình 11.14. *Điều chỉnh tốc độ dùng hai van tràn*

Điều chỉnh tốc độ trên các xilanh tác động kép:

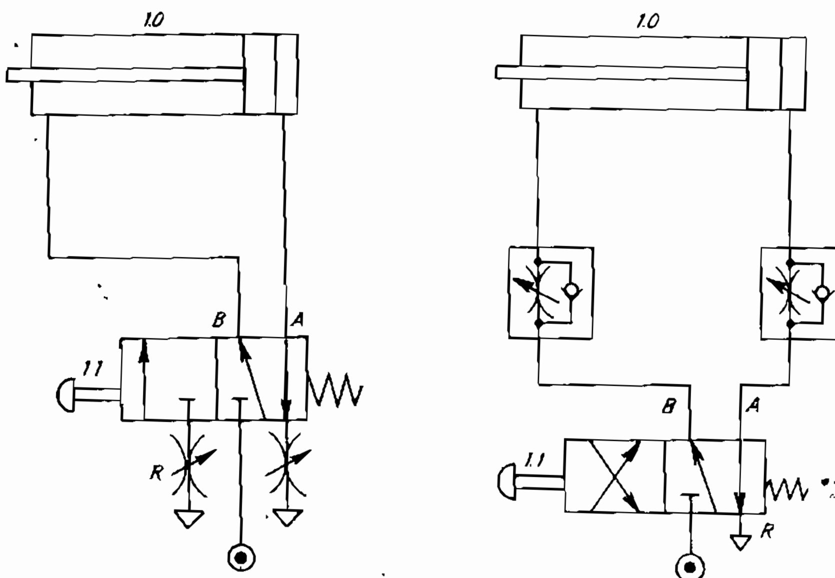
Nhiệm vụ: Điều chỉnh tốc độ tiến và lùi của piston xilanh tác động kép.

Giải: Có 2 phương án:

a) Tiết lưu khí xả (hình 11.15) có thể điều chỉnh một cách riêng rẽ cho các chuyển động tiến và lùi. Thoạt đầu chuyển động không điều hòa lắm cho tới khi cân bằng lực, nhưng sau đó có khả năng điều chỉnh tốt hơn (không phụ thuộc vào tải).

Với van dẫn hướng 5/2 có thể lắp các bộ tiết lưu đơn giản tại chỗ nối ống xả khí.

b) Tiết lưu khí vào (hình 11.16) có thể điều chỉnh riêng rẽ được



Hình 11.15. *Tiết lưu khí xả*

cho các chuyển động tiến và lùi. Chuyển động ban đầu khá điều hoà nhưng ít khả năng điều chỉnh. Không dùng cho trường hợp chịu tải kéo căng. Thường dùng cho các xilanh có thể tích nhỏ và hoạt động ngược lại với tải.

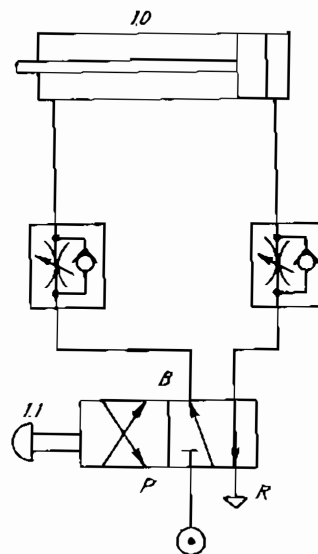
Tăng tốc trong các xilanh tác động đơn và kép.

Nhiệm vụ:

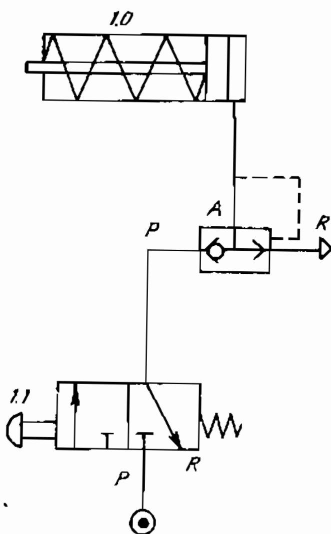
Cần tăng tốc độ lùi của piston và trong xilanh tác động đơn.

Giải:

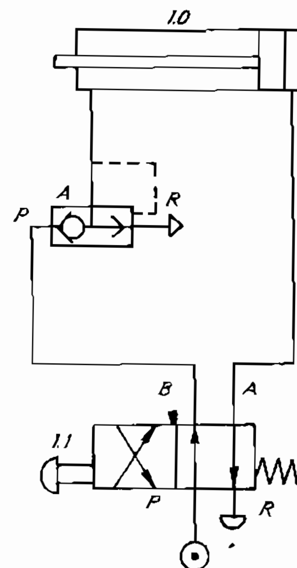
Van xả nhanh được sử dụng để tăng tốc độ của piston trong xilanh (hình 11.17). Điều đó cho phép tránh được thời gian hồi đảo kéo dài nhất là đối với các xilanh tác động đơn.



Hình 11.16. *Tiết lưu khí vào*



Hình 11.17. *Tăng tốc của piston trong xi lanh tác động đơn*



Hình 11.18. *Tăng tốc của piston trong xilanh tác động kép*

Nhiệm vụ: Cần tăng nhanh tốc độ tiến của piston trong xilanh tác động kép.

Giải: Thiết kế mạch như hình 11.18. Khi van 1.1 chuyển vị, để khí nén phải hết sức nhanh chóng thoát khỏi buồng phía trước của xilanh có thể lắp một van xả nhanh ngay sát với xilanh và cho khí thoát ngay ra khí quyển. Không cần thiết phải xả khí qua suốt chiều dài ống dẫn và van.

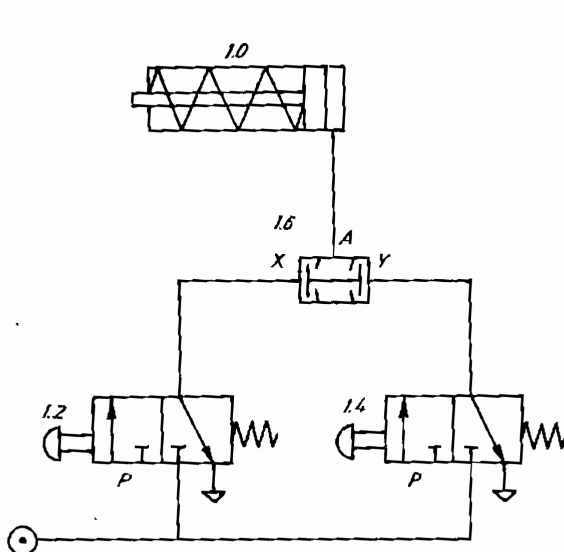
Điều khiển bằng van song áp:

Nhiệm vụ:

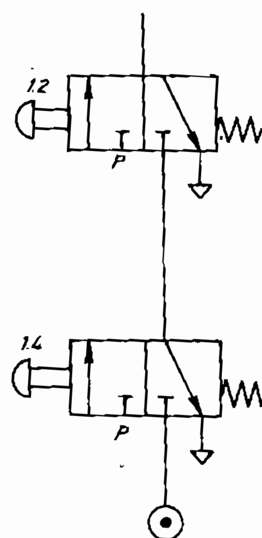
Cần piston của xilanh tác động đơn được chuyển động chỉ khi 2 van dẫn hướng 3/2 tác động đồng thời.

Giải: Có 2 cách:

a) Dùng van song áp (hình 11.19): khi cùng tác động hai van 1.2 và 1.4 tạo ra các tín hiệu X và Y vào van song áp. Do vậy theo cửa A của van song áp khí nén sẽ vào xilanh tạo cho piston chuyển động.



Hình 11.20. *Ghép nối tiếp 2 van*



Hình 11.19. *Điều khiển van song áp*

b) Ghép nối tiếp hai van 1.2 và 1.4 (Hình 11.20). Khi chúng cùng được tác động thì khí nén sẽ được cấp vào xilanh.

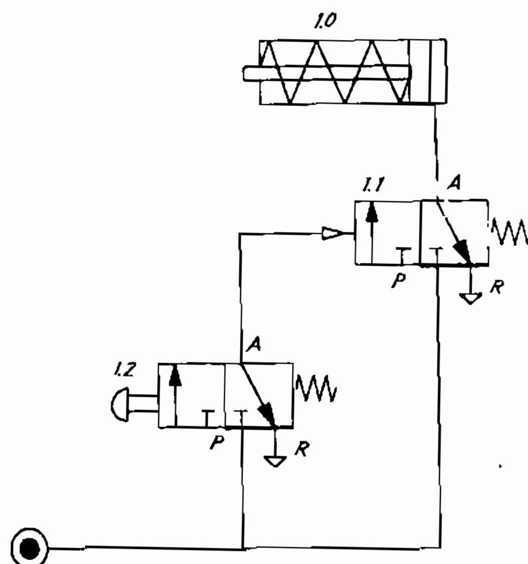
Điều khiển gián tiếp các xilanh tác động đơn.

Nhiệm vụ:

Piston của một xilanh tác động đơn có dung tích lớn (đường kính lớn, hành trình dài, ống dẫn dài) cần phải chuyển động sau khi tác động vào van điều khiển và lùi lại ngay vị trí tận cùng sau khi nhả van đó ra.

Giải:

Thiết kế sơ đồ như hình 11.21. Tác động vào van 1.2 làm cho khí chạy từ P đến A và trên van 1.1 xuất hiện tín hiệu Z làm van 1.1 chuyển vị. Vì vậy thông đường dẫn từ P đến A và piston sẽ chuyển động.



Hình 11.21. *Điều khiển gián tiếp các xilanh tác động đơn*

Điều khiển các mạch thời gian

Yếu tố thời gian thường phải xét đến khi xử lí các thông tin lúc chuyển mạch, thông thường ở các vị trí tận cùng của piston xilanh.

Để thực hiện việc chuyển mạch có thể dùng "các phần tử khí nén điều khiển thời gian" (p-pneumatic time control element). Các phần tử này có thể tạo thành một cách đơn giản bằng cách kết hợp các van dẫn hướng, van tràn và bình tích. Có thể nối ghép trong mạch các chi tiết đơn lẻ này hoặc dùng các đơn nguyên có sẵn đã chứa trong mình các chi tiết này. Đó là các van tác động chậm (time delay valve).

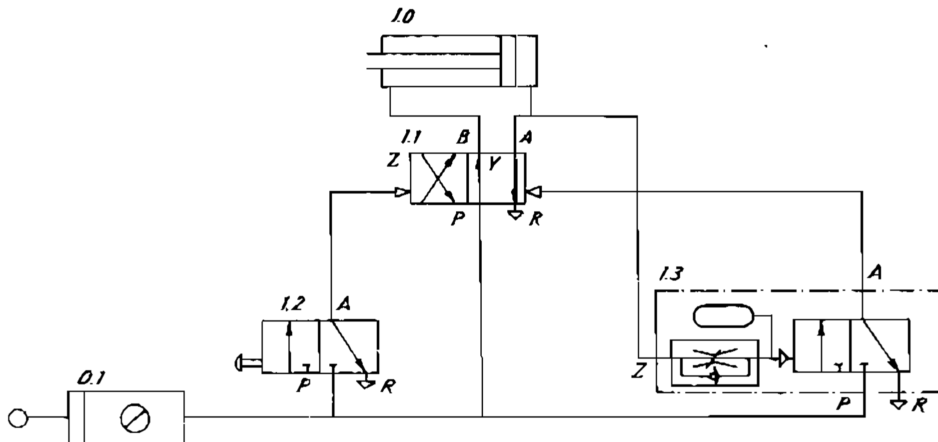
Van tác động chậm gồm một van dẫn hướng 3/2, một van tràn và một bình tích. Van này chia làm 2 loại: van mở chậm và van đóng chậm.

Van mở chậm thường đóng:

Trong sơ đồ 11.22, phần tử 1.3 là van mở chậm thường đóng. Khí nén đi vào cửa Z qua van tràn và tuỳ theo mức điều chỉnh của vít tiết lưu mà một lượng khí nhiều hay ít trong một đơn vị thời gian sẽ đi vào bình tích. Khi áp suất trong bình đã lên đến mức cần thiết thì làm chuyển vị van dẫn hướng 3/2 thường đóng. Nó bịt lối thoát khí từ A đến R. Thời gian cần thiết để tăng áp suất trong bình bằng thời gian tác động chậm của van. Nếu muốn van tác động chậm quay lại vị trí ban đầu thì cửa điều khiển Z phải được xả khí. Khí sẽ đi từ bình tích chạy qua khí quyển

qua van tràn, ống xả và lò xo nén sẽ làm chuyển vị van trượt. Cửa P đóng lại, đường thoát khí từ A đến R được thông.

Trên hình 11.22 là ví dụ các phương án sơ đồ mạch khí nén dùng van mở chậm để duy trì vị trí tận cùng trước của piston xilanh trong một khoảng khắc nhất định.



Hình 11.22. *Mạch khí nén dùng van mở chậm thường đóng.*

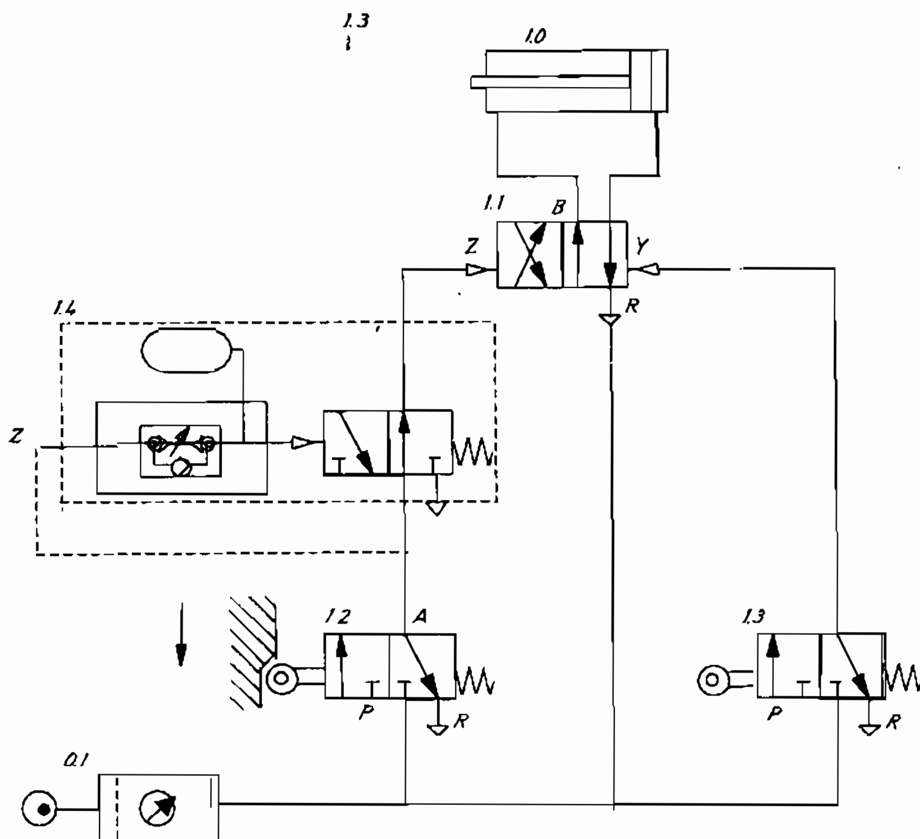
Van đóng chậm thường mở:

Phần tử 1.4 trong sơ đồ 11.23 là van mở chậm thường mở. Ở đây cũng vậy, khí điều khiển tác động vào cửa Z. Khi áp suất điều khiển đã đạt được mức cần thiết trong bình tích thì làm van dẫn hướng 3/2 chuyển động ngược lại. Khi đó dòng khí từ P đến A được khoá lại và đường xả khí từ A đến R được thông. Thời gian tác động chậm tương ứng với thời gian cần thiết để tăng áp suất trong bình tích. Nếu khí được thoát ra khỏi cửa Z thì van dẫn hướng 3/2 lại quay lại vị trí ban đầu.

Hình 11.23 là ví dụ sơ đồ mạch khí nén dùng van đóng chậm.

Đối với cả 2 loại van này thời gian tác động chậm thường từ 0 ÷ 30 giây. Bằng cách sử dụng thêm các bình tích phụ, có thể kéo dài thời gian tác động chậm này. Mức độ chính xác về thời gian lại còn phụ thuộc vào độ sạch và sự ổn định áp suất của khí nén.

Thông thường người ta không yêu cầu cao về độ chính xác thời gian đối với các loại mạch khí nén này. Song quan trọng là tạo ra độ lệch pha các chuyển động.



Hình 11.23. *Mạch khí nén dùng van đóng chậm thường mở.*

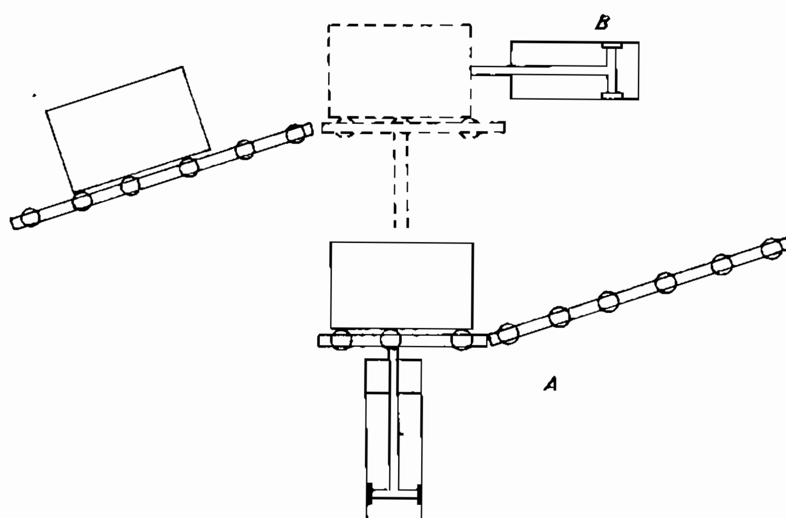
Ví dụ điều khiển chuyển động phối hợp nhiều xilanh

Nhiệm vụ: Các kiện hàng, chuyển đến trên băng tải con lăn, được nâng lên bằng xilanh khí nén A và được xilanh khí nén B đẩy sang một băng tải khác.

Giải:

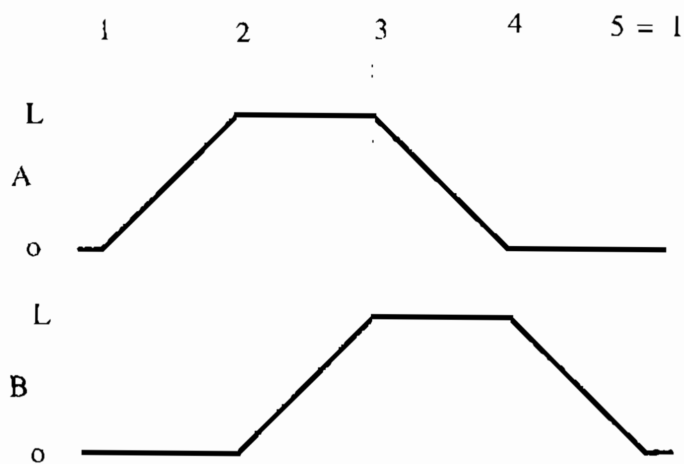
Hình 11.24 là sơ đồ vị trí các xilanh khi thao tác

Như vậy, xilanh B chỉ có thể thực hiện chuyển động đảo chiều lại khi xilanh A đã lùi về vị trí tận cùng sau.



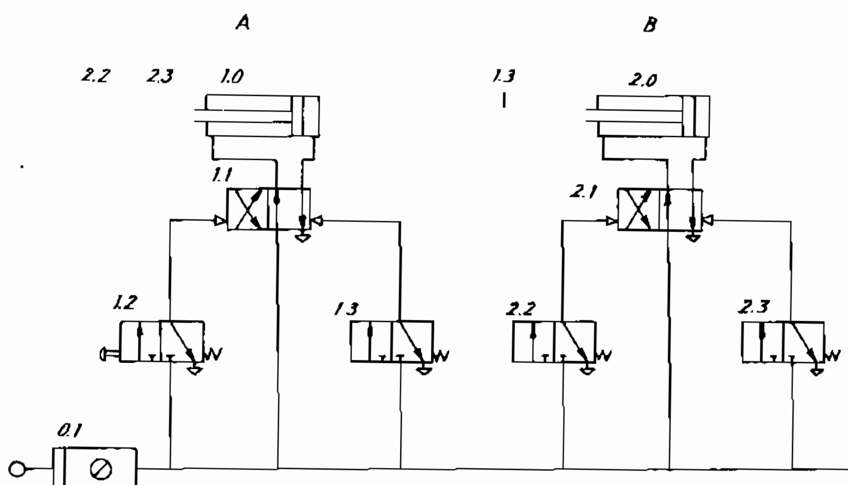
Hình 11.24. *Sơ đồ phối hợp 2 xilanh*

Hình 11.25 là sơ đồ các bước chuyển vị của 2 xilanh A và B.



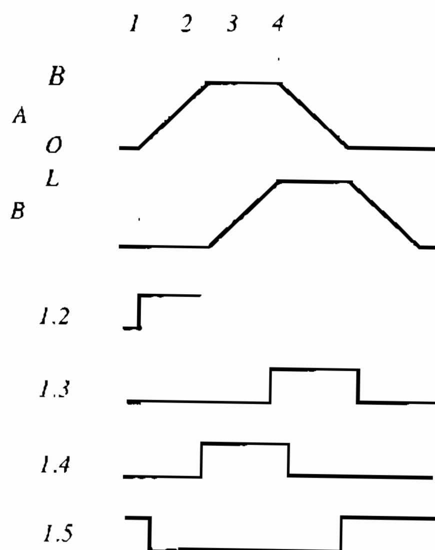
Hình 11.25. *Sơ đồ các bước chuyển vị.*

Hình 11.26 là một phương án thiết kế sơ đồ mạch khí nén.



Hình 11.26. *Sơ đồ mạch khí nén phối hợp 2 xilanh (phương án 1)*

Nói chung, tiến trình thiết kế sơ đồ mạch khí nén phụ thuộc nhiều vào cách ngắt tín hiệu. Có thể kiểm tra trên sơ đồ chuyển vị và điều khiển trên hình 11.27 xem ở chỗ nào cần ngắt tín hiệu.

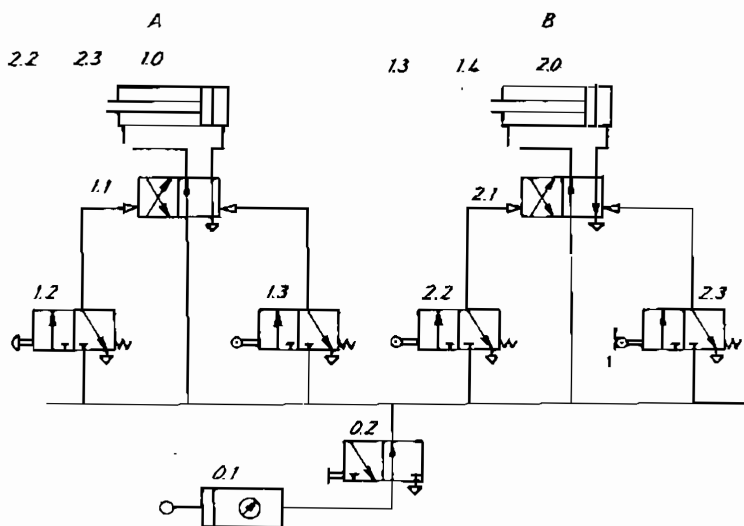


Hình 11.27. *Sơ đồ chuyển vị và điều khiển ngắt tín hiệu*

Như thấy trên hình 11.27 đối với sơ đồ mạch này không cần có ngắt tín hiệu với điều kiện là bộ phận tín hiệu 1.2 không phát tín hiệu ra trước bước 3 nữa. Vì bộ phận tín hiệu này điều khiển bằng tay nên có thể điều kiện này không nhất thiết phải thể hiện trên sơ đồ mạch.

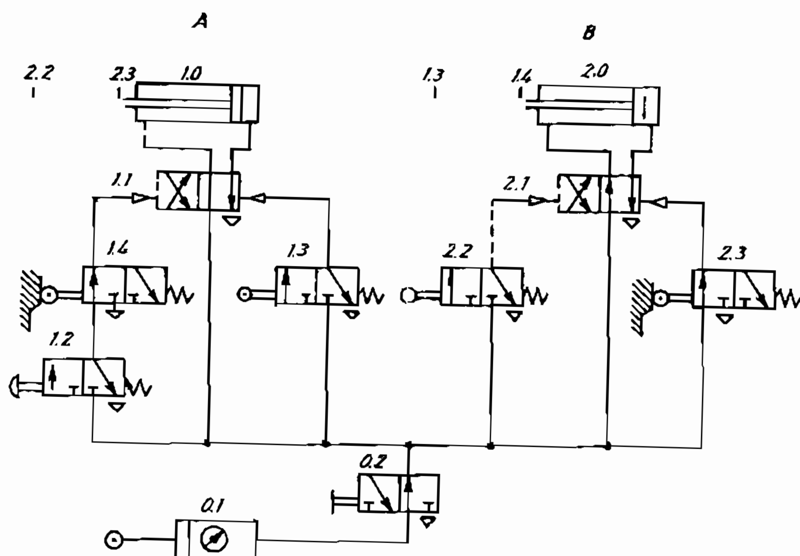
Khi kiểm tra phải đảm bảo sao cho không có tín hiệu khác tác động đồng thời vào cùng một xilanh bởi vì có thể tín hiệu này lại ngăn cản tín hiệu kia.

Cách ngắt tín hiệu đơn giản và tin cậy là bố trí các van điều khiển cần con lăn ở các vị trí cuối hành trình của cần piston như hình 11.28.



Hình 11.28. *Sơ đồ mạch khí nén phối hợp 2 xilanh (phương án 2)*

Trên sơ đồ mạch hình 11.29 có lắp thêm một van ngắt tín hiệu 1.4 ứng với vị trí cuối hành trình lùi của piston xilanh B. Bằng cách dùng các khoá liên động đó, mạch đảm bảo hoạt động bình thường trong toàn bộ chu trình làm việc ngay cả khi van 1.2 hoạt động.



Hình 11.29 *Sơ đồ mạch khí nén phối hợp 2 xilanh (phương án 3)*

11.3. TRUYỀN DẪN ĐỘNG THUỶ LỰC

11.3.1. Đặc điểm chung

Hệ truyền dẫn thuỷ lực có nhiều ưu điểm, chủ yếu là: gọn nhẹ, chịu được tải nặng, quán tính bé. Để thay đổi chuyển động người ta dùng các van điều chỉnh áp lực và lưu lượng, tương đối thuận tiện khi sử dụng.

Tuy nhiên chúng cũng có không ít nhược điểm. Trước hết là hệ thuỷ lực luôn luôn đòi hỏi có bộ nguồn bao gồm bơm thuỷ lực, thiết bị lọc, thiết bị điều chỉnh áp suất, thiết bị làm mát, bình tích dầu v...v. Ngoài ra hệ thống kiểm tra đường ống, các đường hồi dầu và thùng dầu cũng làm phức tạp thêm cho hệ thiết bị thuỷ lực dùng trong tay máy. Nhiệt độ làm việc có ảnh hưởng nhiều đến độ nhớt và áp suất của dầu ép.

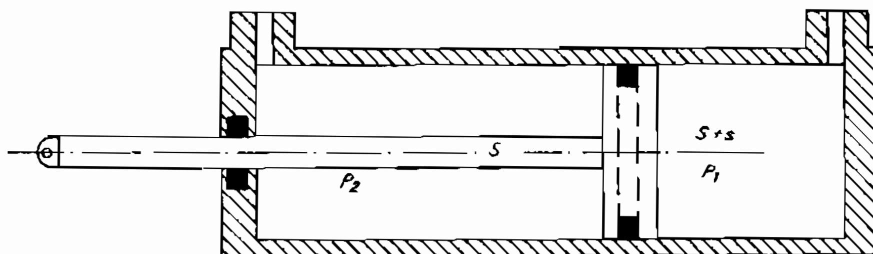
Nhìn chung, hệ truyền dẫn thuỷ lực trong tay máy vẫn được sử dụng rộng rãi hơn cả, nhất là trong trường hợp tải nặng. Hệ truyền dẫn thuỷ lực dùng trong tay máy có những yêu cầu cao về độ chính xác, ma sát thấp, giảm độ chênh lệch giữa ma sát tĩnh và ma sát động để tăng độ nhạy mỗi khi dừng hoặc thay đổi chuyển động, tăng mức điều hoà làm việc nhất là khi chuyển dịch chậm. Về tốc độ làm việc đòi hỏi thay đổi với phạm vi rộng và nhanh. Về kích thước đòi hỏi gọn nhẹ độ cứng vững cao, v...v.

Đối với tay máy truyền dẫn thuỷ lực thường áp dụng hệ điều khiển theo vị trí hoặc theo chu vi kép kín (chu tuyến).

11.3.2. Truyền động thuỷ lực

Xilanh tịnh tiến dùng dầu ép cũng tương tự như xilanh tịnh tiến dùng khí nén, nhưng gọn nhẹ hơn nhiều khi có cùng một cỡ công suất. Trên hình 11.30 là sơ đồ kết cấu của xilanh thuỷ lực tác động hai phía với hai buồng áp suất p_1 và p_2. Bởi vì cần piston có tiết diện ngang là s nằm về một phía nên tác dụng vào piston từ hai phía là không đối xứng.

$$F = (S + s)\, p_1 - Sp_2 \tag{11.21}$$



Hình 11.30. *Xilanh thuỷ lực tác động hai phía*

Có thể khắc phục nhược điểm đó bằng cách tạo cho cần piston nằm về cả hai phía. Tuy nhiên như thế khi chuyển động cần piston lại chiếm nhiều không gian hơn. Trong trường hợp này:

$$F = S\,(p_1 - p_2) \tag{11.22}$$

Để lập mô hình toán cho quá trình hoạt động của xilanh thuỷ lực tác động hai phía và đối xứng về hình học, ký hiệu x là toạ độ chuyển dịch của piston tính từ vị trí trung bình, v - vận tốc, 2h - hành trình. Trên cơ sở các biểu thức đã nhận được ở trên ta viết:

Phương trình lưu lượng, từ (11.9):

$$\frac{S(h + x)}{B}\frac{dp_1}{dt} = q_1 - q_d - q \tag{11.23}$$

$$\frac{S(h - x)}{B}\frac{dp_2}{dt} = q_q + q - q_2 \tag{11.24}$$

Phương trình năng lượng tổn thất, từ (11.5) và (11.6):

Khi chảy tầng: $p_1 - p_2 = Rq$, (11.25)

Khi chảy rối: $p_1 - p_2 = rq^2$ (11.26)

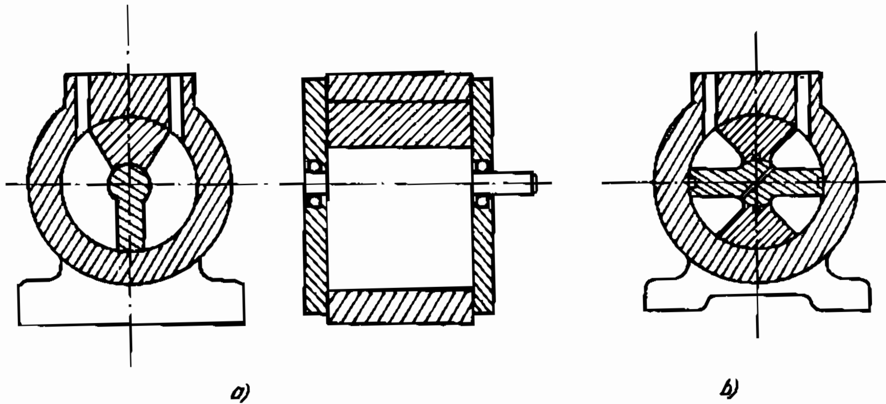
Từ (11.11) ta có: $q_d = Sv$ (11.27)

Phương trình chuyển dịch một khối lượng m với gia tốc $\frac{dv}{dt}$ có lực cản tác dụng F_c và hệ số nhớt động lực φ như sau:

$$m\left(\frac{dv}{dt}\right) = F - \varphi v - F_c, \quad (11.28)$$

Trên cơ sở (11.22) đến (11.28) dẫn đến hệ phương trình vi phân mô tả quan hệ giữa các biến số về trạng thái bên trong: p_1, p_2, u, x với các thông số bên ngoài: q_1, q_2, F_c:

$$\left.\begin{aligned}
&\frac{S(h+x)}{B}\frac{dp_1}{dt} = -\frac{p_1}{R} + \frac{p_2}{R} - Sv + q_1 \\
&\frac{S(h-x)}{B}\frac{dp_2}{dt} = \frac{p_1}{R} - \frac{p_2}{R} + Sv - q_2 \\
&m\left(\frac{dv}{dt}\right) = Sp_1 - Sp_2 - \varphi v - F_c \\
&\frac{dx}{dt} = v
\end{aligned}\right\} \quad (11.29)$$



Hình 11.31. *Xilanh quay*

Để thực hiện các chuyển dịch góc trong tay máy có thể dùng các loại xilanh tịnh tiến. Ví dụ, dùng xilanh thuỷ lực gắn liền với cơ cấu thanh răng bánh răng hoặc là gắn liền với cơ cấu tay quay - thanh truyền hoặc là dùng hai piston chuyển động song song.

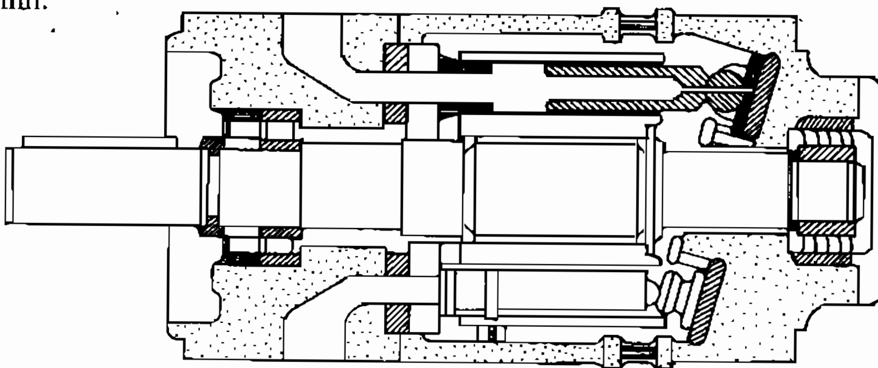
Trên hình (11.31) là các xi lanh quay. Phương án hình (11.31a) có một cánh gạt tĩnh gắn với hộp hình trụ và một cánh gạt gắn với trục ra. Còn phương án (11.31b) có hai cánh gạt tĩnh và hai cánh gạt động. Trong xilanh này thì góc quay nhỏ hơn một nửa nhưng mômen tạo ra lớn gấp đôi khi có cùng kích thức bên ngoài như xilanh hình (11.31a).

Tương tự như đã làm đối với xilanh tịnh tiến ta lập mô hình toán đối với xilanh quay thuỷ lực.

$$\left.\begin{aligned}
&\frac{C(\theta_0+\theta)}{B}\frac{dp_1}{dt} = -\frac{p_1}{R} + \frac{p_2}{R} - C\omega + q_1,\\
&\frac{C(\theta_0-\theta)}{B}\frac{dp_2}{dt} = -\frac{p_1}{R} - \frac{p_2}{R} + C\omega - q_2\\
&J\frac{d\omega}{dt} = Cp_1 - Cp_2 - \varphi\omega - M_c\\
&\frac{d\theta}{dt} = \omega
\end{aligned}\right\} \qquad (11.30)$$

với θ - góc quay của xilanh, $2\theta_0$ - góc hành trình, ω - vận tốc góc, J - mômen quán tính, M_c - mômen cản, C - thể tích chất lỏng khi xilanh quay đi 1 radian. Như vậy thể tích trung bình của chất lỏng là $C\theta_0$.

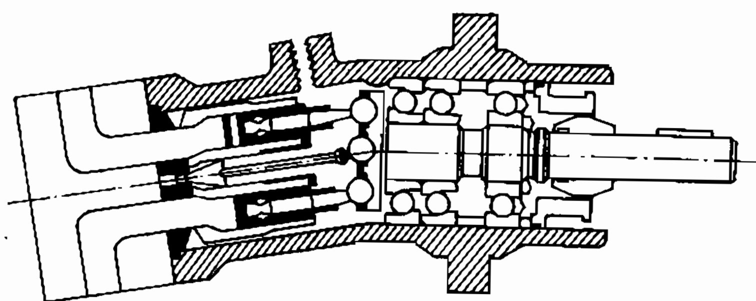
Để thực hiện chuyển động mà không hạn chế phạm vi góc quay có thể dùng một số loại môtơ thuỷ lực có tác động thuận nghịch vừa là bơm, vừa là môtơ. Môtơ thuỷ lực chia làm hai loại: chiều trục và hướng kính.



Hình 11.32. *Môtơ thuỷ lực chiều trục (hãng Rexroth-Sigma).*

Trên hình 10.32 là một loại môtơ thuỷ lực chiều trục có đĩa nghiêng của hãng REXROTH - SIGMA. Trục quay nối liền với blôc các xilanh. Thường có 7 hoặc 9 lỗ xilanh dọc theo chiều trục nằm dưới các góc đều nhau trong thân blôc đó. Các piston chuyển động trong các xilanh có tận cùng là các khớp cầu. Các khớp cầu này nằm trong các gối tì. Chúng tạo với một đĩa nghiêng thành các ổ đỡ thủy tĩnh nhờ các lỗ khoan dẫn dầu xuyên qua các chốt tỳ. Toàn bộ blôc các xilanh và đĩa nghiêng đều nằm trong một thân hộp chứa các gối tựa của trục quay.

Áp lực của dầu tác dụng lên piston hướng dọc trục được phân ra hai thành phần: một thành phần thẳng góc với mặt đĩa nghiêng và thành phần kia theo phương tiếp tuyến. Nhờ vậy mà tạo ra mômen quay. Nếu thay đổi góc nghiêng giữa mặt đĩa nghiêng với trục quay sẽ thay đổi quy luật biến thiên thể tích dầu chứa trong các xilanh ứng với một vòng quay của trục.

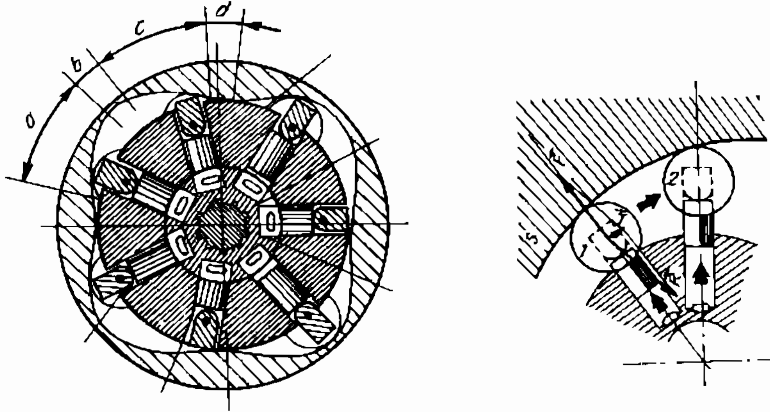


Hình 10.33. *Môtơ thuỷ lực có blôc xilanh nghiêng một góc với trục quay.*

Trên hình 11.33 là một loại môtơ thuỷ lực với thân blôc các xilanh đặt nghiêng với trục quay. Ở đây các đầu piston nằm trong các khớp cầu của đĩa nối vuông góc với trục quay. Thân blôc các xilanh quay quanh trục định hướng và tì khít lên một mặt cầu (mặt phân phối) gia công rất chính xác, để bịt hoặc thông các lỗ dẫn dầu với các xilanh. Nếu thay đổi góc nghiêng giữa trục tâm thân blôc các xilanh và trục quay, sẽ thay đổi quy luật biến thiên thể tích chứa dầu của các xilanh.

Trên hình 11.34 là loại môtơ thuỷ lực hướng kính của Hãng SAMM. Trong thân của Rôto thường chứa 7 hoặc 9 xilanh, trục của chúng đều hướng tâm. Các xilanh được thông với đường dầu áp suất cao hoặc áp suất thấp nhờ vị trí tương đối của mặt phân phối được gia công rất chính xác. Phần đầu của các piston chuyển động trong các xilanh đó đều có các con lăn. Chúng tỳ vào các biên dạng cam phía trong của stato. Biên dạng có nhiều đoạn khác nhau: ở đoạn *a* xilanh thông với đường dầu

áp suất cao đẩy piston tác dụng lên con lăn F. Hợp lực này với phản lực R của biên dạng cam tác dụng lên con lăn tạo ra lực vòng T.



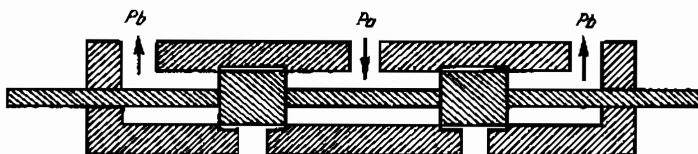
Hình 11.34. *Mô tơ thuỷ lực hướng kính (hãng Samm)*

Chính do lực T này mà có mômen quay của môtơ. Qua đoạn biên dạng chuyển tiếp *b* rồi tới đoạn *c*. Lúc này xilanh được thông với đường dầu áp suất thấp. Tiếp theo là đoạn *d* chuyển tiếp trung gian và cứ thế chuyển sang một chu kì mới lặp lại. Số lượng xilanh và số chu kì thay đổi của biên dạng phải chọn sao cho ở bất kì vị trí tương đối nào giữa rôto và stato đều có ít nhất một con lăn tiếp giáp ở biên dạng *a* để đảm bảo cho rôto quay liên tục.

11.3.3. Thiết bị điều khiển thuỷ lực

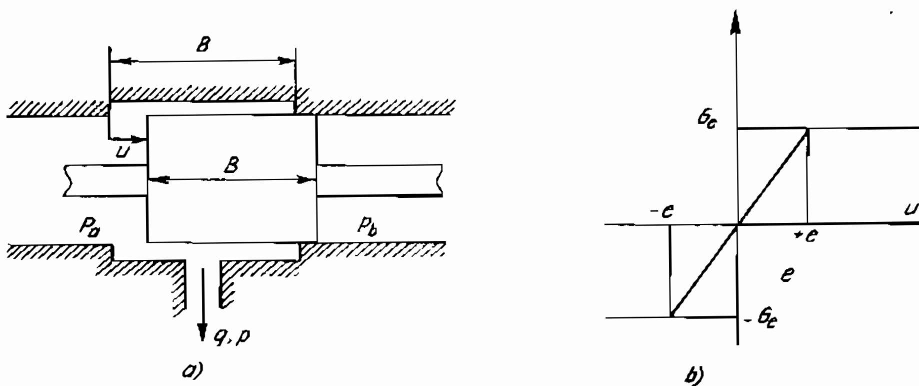
Đặc tính của van phân phối kiểu con trượt

Trong kĩ thuật tay máy thường gặp loại van phân phối thuỷ lực kiểu con trượt như trên hình 11.35.



Hình 11.35. *Sơ đồ van phân phối kiểu con trượt.*

Tuỳ vị trí của con trượt dịch chuyển trong thân van mà lưu lượng dầu thông vào các buồng được nhiều hay ít. Vì vậy cần chú ý đến quan hệ hình học giữa con trượt và thân van ở vùng các cửa đường dẫn. Ví dụ, để khảo sát phía cửa bên phải của van phân phối trên hình 11.35 sẽ xét ba trường hợp sau:



Hình 11.36

a) Con trượt khe vừa khít cửa va; b) Đường đặc tính q(u).

Trường hợp 1 (hình 11.36a) - con trượt che vừa cửa van.

Gọi u là thông số biểu thị độ chuyển dịch của con van trượt và e là chiều rộng rãnh trên thân van.

Nếu e ≤ u thì lưu lượng qua cửa đạt giá trị lớn nhất $q = q_M$:

$$q_M = Ke\sqrt{p_a - p_b} = Ge$$

với p_a, p_b - áp suất ở buồng xilanh;

K và G - các hệ số biến đổi.

Nếu 0 ≤ u 0≤ e ta có:

$$q = Ku\sqrt{2(p_a - p)} = Gu$$

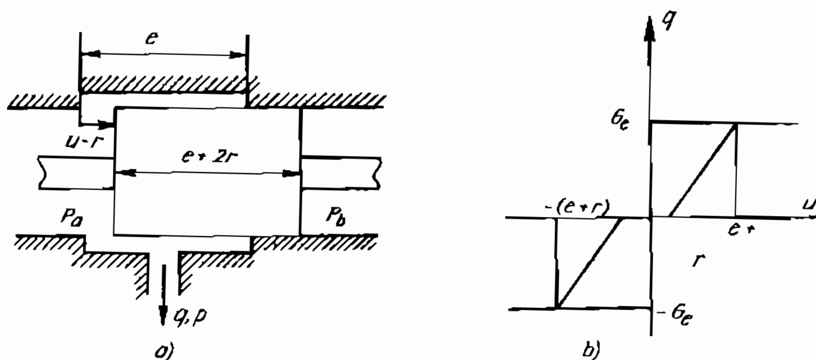
với $p = 0{,}5(p_a + p_b)$ - áp lực trong buồng van.

Nếu -e ≤ u ≤ 0 ta có:

$$q = Ku\sqrt{2(p - p_b)} \rightarrow q \leq Gu$$

Nếu u ≤ -e thì $q = -q_M$.

Từ đó xây dựng đường đặc tính q(u), hình 11.36b.



Hình 11.37. *a) Con trượt che cửa van có dư; b) Đường đặc tính q(u)*

Trường hợp 2 (hình 11.37) - con trượt che cửa van có dư (lượng dư là 2-), lúc này ta có:

1) $e + r \leq u \rightarrow q = q_M = Ge$;

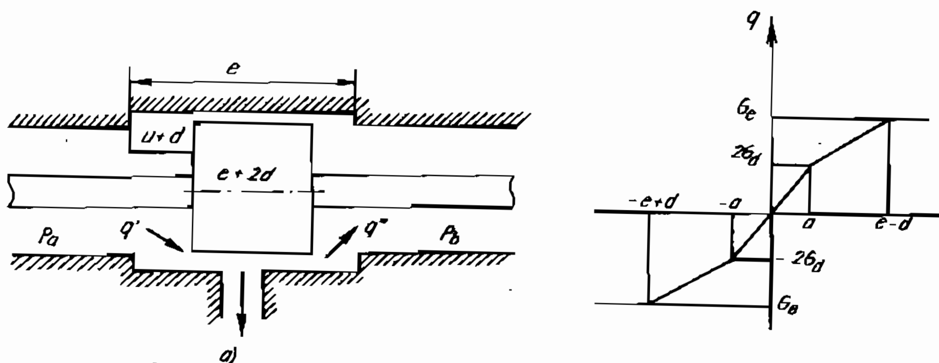
2) $r \leq u \leq e + r \rightarrow q = G(u - r)$;

3) $-r \leq u \leq +r \rightarrow q = 0$;

4) $-e - r \leq u \leq -r \rightarrow q = G(u+r)$;

5) $u \leq -e - r \rightarrow q = -q_M = - Ge$.

Đường đặc tính q(u) của trường hợp này biểu thị trên hình (11.37b).



Hình 11.38. *a) Con trượt che chưa khít cửa van b) Đường đặc tính q(u).*

Trường hợp 3 (hình 11.38a) - con trượt che chưa khít cửa van (lượng thiếu - 2d). Nếu gọi q' là phần lưu lượng từ cửa áp suất cao p_a đến buồng đang có áp suất p và p'' là phần lưu lượng từ buồng áp suất p đến cửa áp suất thấp p_b, thì lưu lượng hữu dụng q = q' - q'' và lưu lượng tổn thất q^* sẽ bằng q'' hoặc q' tuỳ thuộc dấu của q. Ta xét:

1) $e - d \le u$ $\rightarrow$ $q' = q_M$ $q'' = 0$ $q = q_M$ $q' = 0$

2) $d \le u \le e - d$ $\rightarrow$ $G(u + d)$ $q''=0$ $q = q'$ $q^* = 0$

3) $-d \le u \le +d$ $\rightarrow$ $q' = G(u + d)$ $q'' = -G(u - d)$

$q = 2Gu$, $q^* \neq 0$

4) $-e + d \le u \le -d$ $\rightarrow$ $q' = 0$ $q'' = -G(u - d)$

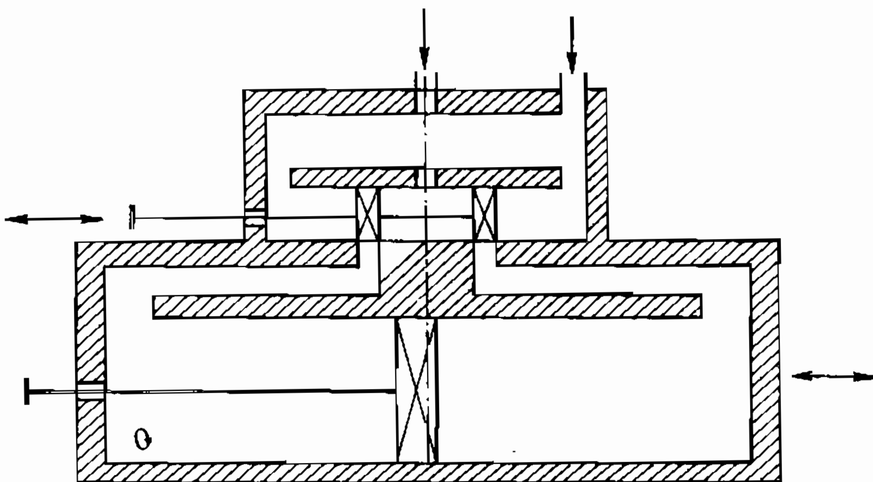
$q = G(u - d)$, $q^* = 0$

5) $u \le -e + d$ $\rightarrow$ $q' = 0$, $q''=+q_M$, $q=-q_M$, $q^*=0$.

Từ đó chúng ta có đường đặc tính q(u) của trường hợp này như hình 11.38b.

Hệ thống trợ động thuỷ lực

Hệ thống trợ động thuỷ lực (the hydraulic servo system) có đặc điểm là cơ cấu chấp hành (đầu ra) tái hiện các quy luật chuyển động từ cơ cấu điều khiển (đầu vào), đồng thời luôn luôn giữ liên hệ phản hồi giữa đầu ra và đầu vào.

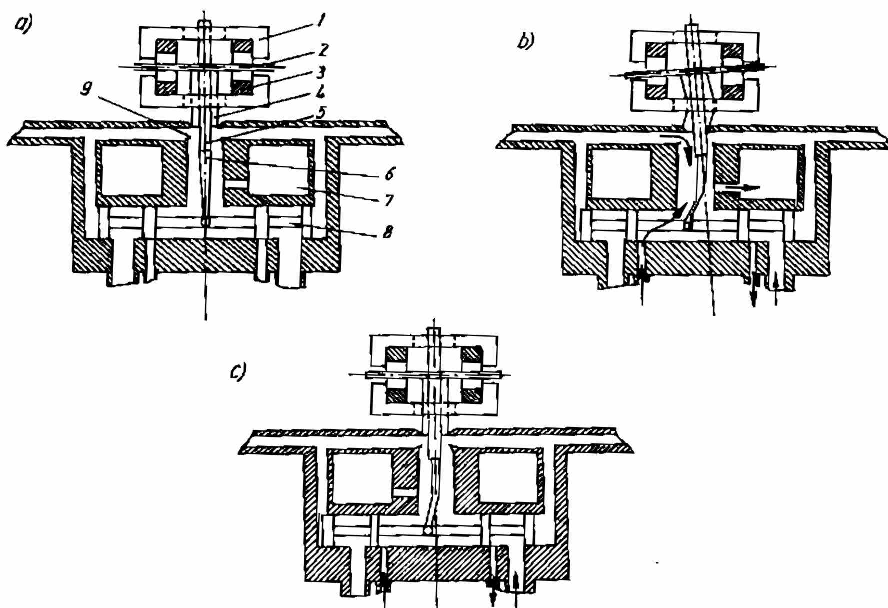


Hình 11.39. *Hệ thống bám thuỷ lực*

Trên hình 11.39 là sơ đồ hệ thống bám thuỷ lực gồm van phân phối con trượt và xilanh động. Ở đây thân van con trượt gắn liền với thân xilanh động tạo nên một mối liên hệ ngược cần thiết. Khi con trượt ở vị trí trung gian, dầu ép thông qua các khe có tiết diện như nhau và do vậy áp lực trong 2 buồng xilanh cũng bằng nhau. Khi dịch con trượt về phía bên này hoặc bên kia so với vị trí trung gian thì áp lực trong 2 buồng sẽ chênh lệch nhau làm cho thân xilanh và thân van con trượt đều dịch chuyển. Các thông số chuyển dịch được xác định bởi tỷ lệ diện tích các khe dầu. Tỷ lệ này do vị trí con trượt (so với vị trí trung gian) định đoạt và bản thân vị trí con trượt lại phụ thuộc vào tín hiệu điều khiển. Tín hiệu điều khiển có thể là tín hiệu điện hoặc tín hiệu cơ v... v... và thường hơn là tín hiệu điện . Vấn đề là độ chính xác định lượng giữa tín hiệu điện và tỷ lệ diện tích các khe dầu vào xilanh.

Vì thế xuất hiện nhiều phương pháp cải tiến khác nhau. Trong đó van trợ động thuỷ lực (the hydraulic servo valve) được quan tâm đặc biệt.

Trên hình 11.40 giới thiệu sơ đồ nguyên lý hoạt động của loại van trợ động thuỷ lực MOOG, là sản phẩm của một hãng nổi tiếng ở nhiều nước.



Hình 11.40. *Van trợ động thuỷ lực MOOG*

Như trên hình 11.40a van trợ động thuỷ lực gồm 3 phần chính. Phần thứ nhất có các cực nam châm 1, lõi 2 và cuộn cảm 3. Phần thứ hai có ống móng 4 nối giữa lõi 2 và lưỡi gà 5. Lưỡi gà 5 cùng với vòi phun 9 là một cặp "vòi phun - màng chắn". Phần thứ ba chủ yếu gồm con trượt và các bộ phận liên quan.

Khi có tín hiệu điện điều khiển lõi 2 quay nghiêng đi, làm biến dạng ống mỏng 4 và di chuyển vị trí của lưỡi gà 5, hình 10.40b, lúc này lõi 2 quay nghiêng về phía bên phải, làm lưỡi gà chặn vòi phun phía bên phải. Do vậy *áp suất điều khiển* tăng lên, kéo theo đẩy con trượt về phía bên trái. Con trượt di chuyển nên thay đổi diện tích khe cửa làm *áp suất truyền lực* tăng lên và tác động đến xilanh thực hiện truyền tải, ví dụ, làm chuyển dịch khớp động tay máy. Khi con trượt di chuyển về phía trái cũng gạt lưỡi gà 5 như một lò xo phản hồi, về phía trái. Do vậy tạo nên một mômen tác động lên tín hiệu điều khiển đưa vào. Khi cân bằng hai mômen này thì con trượt sẽ nằm yên ở vị trí mong muốn của người điều khiển. Nếu giữ được lưu lượng dầu ổn định thì vị trí con trượt cũng sẽ ổn định.

Hệ thống trợ động thuỷ lực được dùng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực kĩ thuật, nhất là trong kĩ thuật tự động hoá các quá trình công nghệ. Liên hệ phản hồi giữa đầu ra và đầu vào của hệ có thể là liên hệ theo vị trí, theo vận tốc chuyển động hoặc theo lực tải. Thường dùng hơn cả là liên hệ phản hồi theo vị trí, vì nhờ liên hệ này có thể đạt được độ chính xác cao khi tái hiện quy luật điều khiển và độ ổn định chuyển động.

11.4. TRUYỀN DẪN ĐỘNG THUỶ - KHÍ KẾT HỢP

Xu hướng tạo ra các hệ truyền dẫn hỗn hợp nhằm phát huy các ưu điểm và bù trừ các nhược điểm của các loại truyền dẫn riêng lẻ.

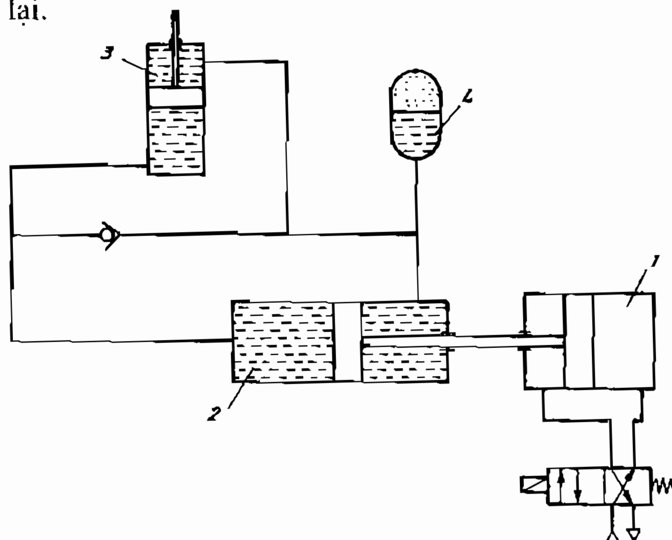
Hình 11.41. *Sơ đồ hệ truyền dẫn thuỷ lực - khí nén*

Trên hình 11.41 là sơ đồ hệ truyền dẫn hỗn hợp thuỷ lực - khí nén. Xilanh thuỷ lực hoạt động song song với xilanh khí nén để đảm bảo việc hiệu chỉnh vận tốc và vị trí của khâu chấp hành của tay máy.

Khí nén từ nguồn vào một trong hai buồng của xilanh khí nén (1) qua van phân phối (7) và làm cho piston chuyển dịch với vận tốc được hiệu chỉnh bằng van tiết lưu thuỷ lực (3). Khi đó van phân phối (5) nằm ở phía bên phải để thông với cả hai buồng của xilanh thuỷ lực. Van phân phối (5) có thể đóng vai trò như một khoá thuỷ lực để cố định vị trí của tay máy. Với tính chất tương tự như ở phần tử (3), nếu dùng van tiết lưu điều khiển bằng điện thì có thể dễ thực hiện điều khiển vị trí theo tín hiệu phản hồi.

Trong kỹ thuật robot công nghiệp còn ứng dụng các truyền dẫn điện - khí với mục đích tương tự như trên, nhưng thay truyền dẫn thuỷ lực bằng truyền dẫn điện.

Trong sơ đồ hệ truyền dẫn thuỷ - khí trên hình 11.42 có đặt thêm một xilanh khí nén phụ (1) trước xi lanh thuỷ lực (2) cốt để tránh phải dùng nguồn thuỷ lực. Khí nén vào một buồng của xilanh (1) tạo áp lực trong buồng xilanh (2) đẩy dầu làm piston xilanh chấp hành (3) của tay máy chuyển dịch theo một phía và sẽ đổi chiều khi piston của xilanh (1) đi về phía ngược lại.



Hình 11.42. *Sơ đồ hệ truyền dẫn thuỷ - khí với xilanh khí nén phụ*

Truyền dẫn hỗn hợp điện - thuỷ lực được dùng tương đối nhiều. Trong đó đầu vào dùng truyền động điện công suất bé, còn đầu ra là truyền động thuỷ lực. Truyền động điện tạo ra tín hiệu dịch chuyển cho hệ khuyếch đại thuỷ lực, có thể hình thành hệ trợ động kín hoặc hở dùng động cơ bước.

CHƯƠNG XII

THIẾT BỊ CẢM BIẾN

12.1. GIỚI THIỆU CHUNG.

Các thiết bị cảm biến (sensors) trang bị cho robot để thực hiện việc nhận biết và biến đổi thông tin về hoạt động của bản thân robot và của môi trường, đối tượng mà robot phục vụ. Theo phạm vi ứng dụng các loại cảm biến dùng trong kỹ thuật robot, có thể phân ra 2 loại:

- Cảm biến nội tín hiệu (internal sensors) đảm bảo thông tin về vị trí, về vận tốc, về lực tác động trong các bộ phận quan trọng của robot. Các thông tin này là những tín hiệu phản hồi phục vụ cho việc điều chỉnh tự động các hoạt động của robot.

- Cảm biến ngoại tín hiệu (external sensors) cung cấp thông tin về đối tác và môi trường làm việc, phục vụ cho việc nhận dạng các vật xung quanh, thực hiện di chuyển hoặc thao tác trong không gian làm việc. Để làm được các việc đó, cần có các loại cảm biến tín hiệu xa, cảm biến tín hiệu gần, cảm biến "xúc giác" và cảm biến "thị giác" v.v...

Để thực hiện nhiệm vụ của các loại cảm biến nội tín hiệu và ngoại tín hiệu nói trên có thể dùng nhiều kiểu cảm biến thông dụng hoặc chuyên dụng. Các kiểu cảm biến thông dụng không chỉ dùng cho kỹ thuật robot mà còn dùng nhiều trong các thiết bị kỹ thuật khác. Có nhiều tài liệu kỹ thuật về các kiểu cảm biến này.

Tuỳ theo các dạng tín hiệu cần nhận biết mà phân thành các kiểu cảm biến khác nhau: cảm biến lực, vận tốc, gia tốc, vị trí, áp suất, lưu lượng, nhiệt độ v.v.

Tuỳ theo cách thức nhận tín hiệu lại phân ra các kiểu khác nhau. Ví dụ, cũng là cảm biến vị trí nhưng có kiểu cảm ứng, kiểu điện dung, kiểu điện trở, kiểu điện quang v.v.

Dưới đây giới thiệu một số kiểu cảm biến thường dùng trong kỹ thuật robot.

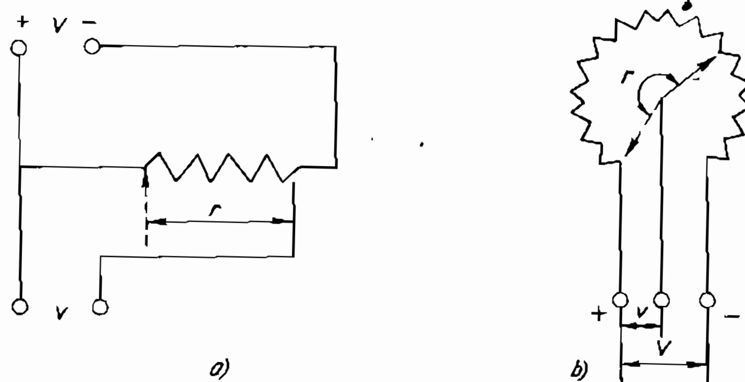
12.2. CẢM BIẾN VỊ TRÍ, VẬN TỐC VÀ GIA TỐC.

12.2.1. Cảm biến vị trí kiểu chiết áp.

Đây là loại cảm biến vị trí kiểu điện trở thay đổi theo nguyên lý chiết áp rất quen biết. Nguyên lý hoạt động của chiết áp được mô tả trên sơ đồ mạch cơ bản (hình 11.1a) hoặc là sơ đồ bố trí mạch thực tế (hình 12.1b) và thể hiện bằng quan hệ sau:

$$v = V\frac{r}{R} \qquad (12.1)$$

Giá trị điện áp đầu vào v sẽ thay đổi từ v = 0 khi r = 0 đến giá trị bằng điện áp cấp vào V khi r = R. Nếu gắn sự chuyển dịch vị trí cần đo với đầu trượt r của chiết áp thì thông qua giá trị điện áp v sẽ biến đổi tỷ lệ thành giá trị chuyển dịch vị trí cần đo.



Hình 12.1. *Sơ đồ mạch chiết áp*

Kiểu cảm biến này hay được dùng để xác định độ dịch chuyển góc của các trục quay. Người ta lại có thể dùng nó để xác định vận tốc góc bằng cách vi phân bậc nhất và xác định gia tốc bằng cách vi phân bậc 2 đại lượng dịch chuyển.

Kiểu cảm biến chiết áp được dùng rất rộng rãi trước hết là vì giá thành thấp, độ bền sử dụng tương đối cao (nhờ áp dụng công nghệ vật liệu chất dẻo cải tiến bộ phận đầu trượt r nên có thể đạt tới bộ bền 10^7 chu kỳ), độ tuyến tính khá cao v.v. Tuy nhiên lại có các hạn chế như làm việc với tốc độ thấp (10 vòng/ phút đối với trường hợp quay và 1 m/s đối với trường hợp tịnh tiến), chất lượng chỗ tiếp xúc của bộ phận trượt có thể gây nhiễu và giảm độ nhạy.

12.2.2. Vận tốc kế.

Phạm vi sử dụng vận tốc kế (tachometers) và gia tốc kế (accelerometers) ngày nay trở nên thu hẹp, mà thông dụng hơn là xác định theo số gia của các thông tin cảm biến vị trí bằng kỹ thuật số hay kỹ thuật vi mạch. Cách làm đó đạt được độ chính xác cao hơn và ngày càng rẻ hơn.

Thường dùng các thiết bị sau để thực hiện chức năng của vận tốc kế:

- Phát tốc (tachogenerator) dùng một chiều

Khi stato được kích từ tạo nên từ thông thì trong các cuộn cảm trên roto có suất điện động từ cảm với giá trị trung bình tỷ lệ với góc quay của roto.

- Phát tốc không đồng bộ dòng xoay chiều

Khi dòng điện xoay chiều chạy qua cuộn dây sơ cấp của stato thì điện áp trên các đầu dây cuộn thứ cấp của stato sẽ có cùng tần số, biên độ và tỷ lệ thuận với vận tốc góc của roto.

- Phát tốc đồng bộ

Nam châm vĩnh cửu trên stato gây dòng điện cảm trong cuộn dây của stato. Tần số và giá trị điện áp của nó tỷ lệ thuận với vận tốc của roto.

- Phát tốc xung

Đĩa quay có khe rãnh đặt trước nguồn sáng tạo ra các xung có tần số tỷ lệ với vận tốc góc quay.

12.2.3. Cảm biến vị trí kiểu biến áp

Cảm biến kiểu này hoạt động theo nguyên lý của một biến áp sai động (differential transfomer): lõi từ chuyển động tương đối với 2 cuộn dây cố định và làm việc thay đổi dòng cảm ứng giữa chúng.

Trên hình 12.2 là sơ đồ biến áp xoay. Roto có một cuộn dây, còn stato có một hoặc một vài cuộn dây cảm ứng đồng bộ.

Giả thiết cấp vào cuộn dây của roto một điện áp:

$$u_r = U \sin\omega t \qquad (12.2)$$

thì trong các cuộn dây trên stato sẽ xuất hiện các điện áp cảm ứng:

$$u_{s1} = KU_r \cos r \sin(\omega t + \varphi) \qquad (12.3)$$

$$u_{s2} = KU_r \cos r \sin(\omega t + \varphi) \qquad (12.4)$$

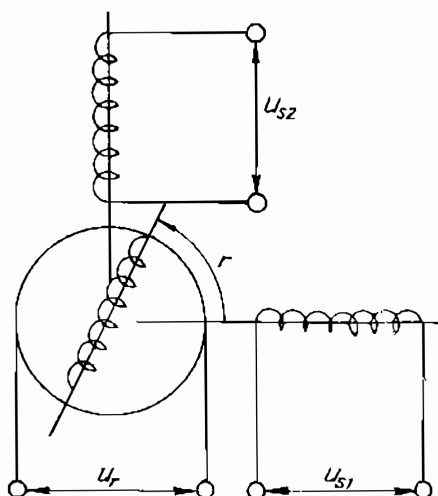
trong đó:

K - hệ số biến áp

φ - độ lệch pha

Từ các công thức trên có thể xác định được góc r.

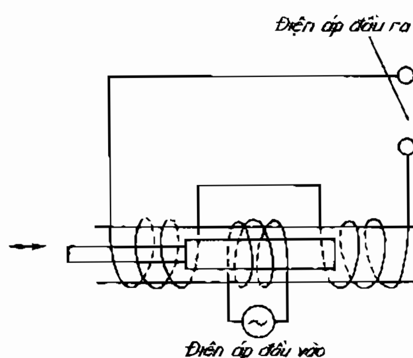
Tuy nhiên sự biến động biên độ điện áp làm giảm độ chính xác tính toán. Bởi thế người ta sử dụng phương pháp giải điều biến đồng bộ (synchronous demodulation) trên cơ sở đối chiếu với tín hiệu chuẩn (không trùng với điện áp cấp vào roto). Trong trường hợp biến áp xoay nhiều cực (không phải 2 cực như hình 12.2) thì độ chính xác có thể tăng lên. Người ta thường sử dụng kết hợp bộ biến áp xoay với bộ biến đổi điện tử số để nâng cao độ chính xác.



Hình 12.2. Sơ đồ biến áp xoay

Cảm biến vị trí kiểu biến áp làm việc tin cậy, chính xác và phù hợp với dải rộng vận tốc quay. Vì không dùng đến vòng tiếp điểm như kiểu chiết áp nên chúng có thể làm việc với vận tốc cao (đến 9000 vòng/phút). Tuy nhiên lại đòi hỏi độ chính xác cao về chế tạo và lắp ráp, nên giá thành cũng cao hơn nhiều.

Tương tự, đối với trường hợp tịnh tiến có cảm biến vị trí kiểu biến áp sai động thay đổi tuyến tính LVDT (Linear Variable Differential Transformer), như trên hình 12.3. Bao bọc xung quanh lõi từ là một cuộn dây sơ cấp và hai cuộn dây thứ cấp giống hệt nhau. Khi dịch chuyển lõi từ độ từ cảm tương hỗ giữa cuộn dây sơ cấp và các cuộn dây thứ cấp sẽ biến đổi tuyến tính theo độ dịch chuyển đó.

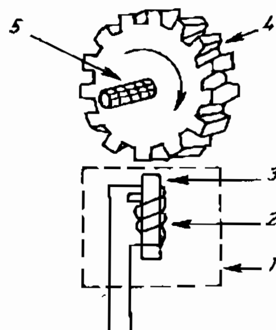


Hình 12.3. *Sơ đồ cảm biến vị trí kiểu LVDT*

12.2.4. Cảm biến điện từ.

Trên hình 12.4. giới thiệu sơ đồ cảm biến điện từ (magnetic tachometer) đo vận tốc hoặc độ dịch chuyển. Đầu đo 1 gồm cuộn dây

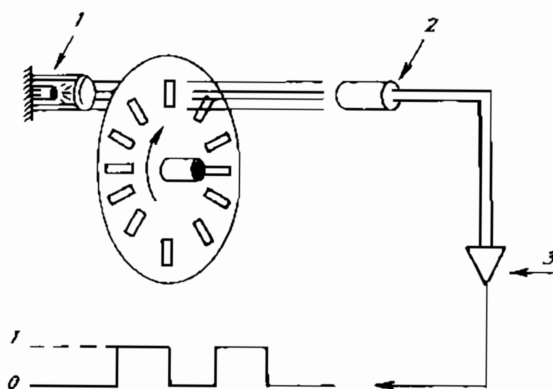
cảm 2 cuộn xung quanh lõi nam châm vĩnh cửu 3. Trên đầu trục quay 5 gắn một đĩa có vấu 4. Khi trục quay, khoảng cách tương đối giữa đỉnh vấu hoặc chân vấu so với vị trí lõi nam châm là khác nhau nên tạo ra sự thay đổi từ thông và gây ra xung điện đầu ra.



Hình 12.4. *Sơ đồ cảm biến điện từ*

12.2.5. Cảm biến điện quang

Trên hình 12.5 giới thiệu sơ đồ cảm biến điện quang, gồm các đĩa (đối với trường hợp quay) hoặc các thước (đối với trường hợp tịnh tiến) có vạch tối sáng điều nhau. Một bên đặt nguồn sáng 1, một bên đặt các quang trở 2. Do thay đổi vị trí tương đối của các phần di động so với phần cố định nên tần số và lượng ánh sáng lọt vào quang trở cũng thay đổi. Tín hiệu qua bộ khuyếch đại 3 và tạo các xung, từ đó suy ra độ dịch chuyển hoặc vận tốc.



Hình 12.5. *Sơ đồ cảm biến điện quang*

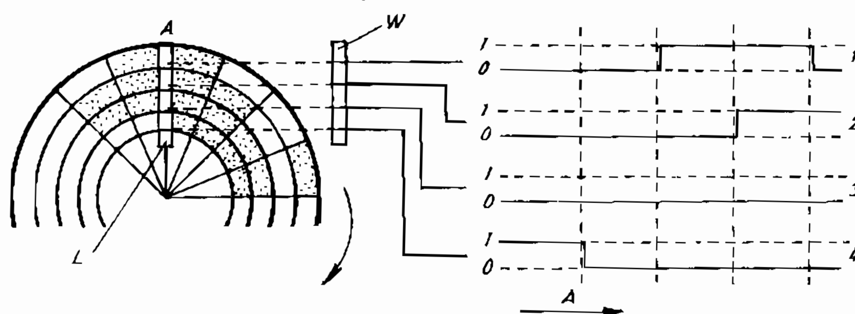
Thiết bị cảm biến mã hoá quang học là một kiểu cảm biến điện quang có nguyên lý làm việc như đã trình bày ở trên, nhưng đã được đầu

tư và chế tạo chuyên dụng thành những thương phẩm quen biết với tên gọi là optical encoders.

Thiết bị cảm biến mã hoá quang học là thiết bị biến dịch chuyển góc điển hình. Tín hiệu đầu ra của cảm biến loại này là tín hiệu số nên rất thuận tiện khi nối ghép với máy tính mà không cần thêm bộ chuyển đổi A/D nào.

Người ta phân ra 2 loại chính: cảm biến mã hoá giá trị tuyệt đối (absolute encoders) và giá trị số gia (incremental encoders). Loại thứ 2 được dùng rộng rãi hơn vì giá thành thấp hơn. Nếu khi cần số liệu đọc ra là vận tốc thì chỉ dùng loại thứ 2 này.

Cảm biến mã hoá tuyệt đối có bộ phận chính là đĩa trong suốt. Trên đó có từ 2 đến 30 dải đường riêng biệt chiều rộng như nhau và các đoạn sáng, tối tạo nên đĩa vạch chuẩn. Nguồn sáng sẽ chiếu lọt vào các cảm biến quang (thường dùng phototransistor hoặc photovoltaic). Do vậy cảm biến lần lượt tạo ra các xung như trên hình 12.6.

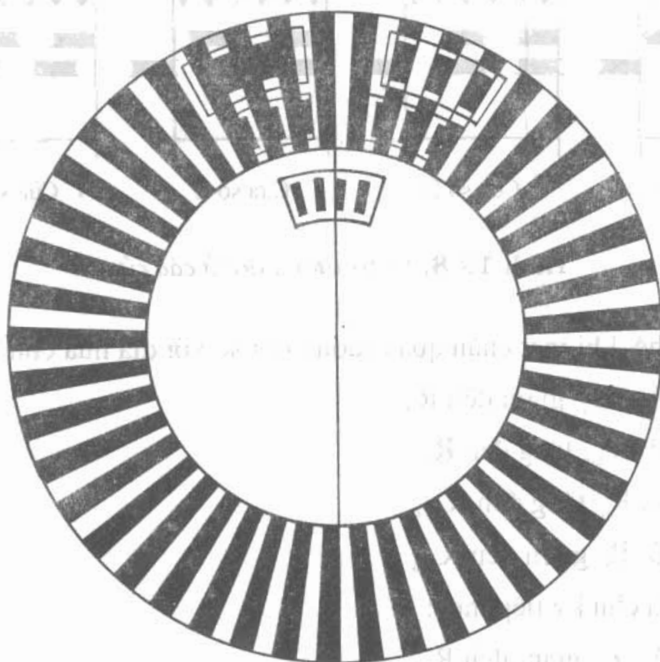


Hình 12.6. *Tín hiệu đầu ra dạng sóng của thiết bị cảm biến mã hoá tuyệt đối*

Như trên hình 12.6, trên đĩa có 4 dải đường, với 16 vị trí chia hình tròn ra 16 hình rẻ quạt, góc đỉnh là $360^0/16 = 22,5^0$. Phía bên phải hình 12.6 là các tín hiệu trong 1/4 vòng quay đã số hoá: số 0 ứng với khi quay qua đoạn tối, số 1 - khi quay qua đoạn sáng. Ở đây đã mã hoá theo hệ Gray Code. A là vị trí xuất phát để tính toán và cũng là nơi đặt hệ thống cảm biến quang và nguồn sáng L, còn W là bộ khuyếch đại và xử lý tín hiệu dạng sóng.

Cảm biến mã hoá số gia có cấu tạo đơn giản. Bộ phận chính là đĩa gắn liền với trục quay, chế tạo từ loại thuỷ tinh đặc biệt, có hệ số giãn nở nhiệt rất thấp, nên còn gọi là đĩa kính. Trên mặt đĩa kính được chia vạch đen trắng đều nhau. Đĩa kính có bán kính càng lớn thì khả năng chia độ càng cao. Khi đĩa kính quay, ánh sáng từ nguồn truyền qua những khoảng trắng đến các quang trở đặt đối diện tạo ra những tín hiệu điện. Tín hiệu nhận được là tín hiệu thay đổi có quy luật, được cho qua bộ biến đổi đưa về dạng tín hiệu hình sin hoặc tín hiệu dạng xung cơ bản.

Để tạo ra sự thay đổi quang thông khi cho luồng ánh sáng qua đĩa kính quay, người ta dùng một mặt chắn đứng yên có cấu tạo như hình 12.7. Trên mặt chắn có 4 ô cửa sổ, mỗi ô có vạch đen trắng giống hệt trên đĩa kính, nhưng bố trí sao cho vạch khắc trên 4 ô cửa sổ này lệch pha nhau1/4 chu kỳ vạch khắc.



Hình 11.7. *Đĩa kính và bố trí các ô cửa sổ trên mặt chắn*

Mỗi dịch chuyển góc quay của đĩa kính tạo ra sự thay đổi diện tích phần ánh sáng lọt qua, do vậy thay đổi quang thông dẫn tới sự thay đổi tín hiệu điện.

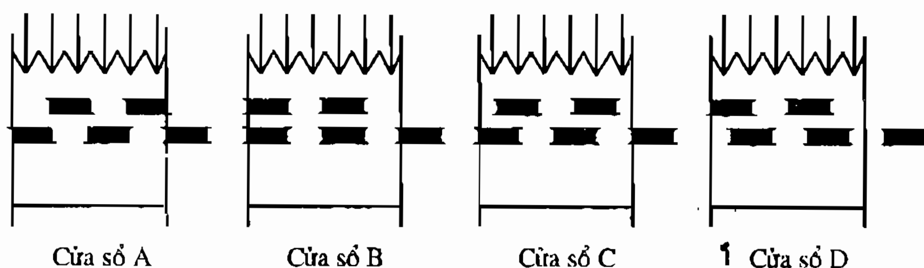
Hình 12.8 cho thấy:

- Tại cửa sổ A: các vạch trên cửa sổ che kín các khoảng trống trên đĩa kính nên ánh sáng không lọt qua. Lúc này điện trở là R_{max} .

- Tại cửa sổ B: các vạch trên cửa sổ trùng khít với các vạch trên đĩa kính và khoảng trống được mở hết cỡ cho ánh sáng đi qua. Lúc này điện trở là R_{min}.

- Tại cửa sổ C: các vạch trên cửa sổ đi vào đến giữa khoảng trống trên đĩa kính nên diện tích phần ánh sáng lọt qua chỉ một nửa. Đây là vị trí trung hoà và có điện trở là $R_0 = (R_{max} - R_{min})/2$.

- Tại cửa sổ D: các vạch trên cửa sổ chớm vào nửa vạch khắc tiếp theo. Lúc này, giống như cửa sổ C, diện tích cho ánh sáng đi qua chỉ còn một nửa và điện trở là R_0.



Hình 12.8. *Vị trí tương đối ở các cửa sổ*

Như thế, khi mặt chắn quay tương đối so với đĩa nửa chu kỳ thì:

- Tại A: R_{max} giảm đến R_0
- Tại B: R_{min} tăng đến R_0
- Tại C: R_0 tăng đến R_{max}
- Tại D: R_0 giảm đến R_{min}

Và nửa chu kỳ tiếp theo:

- Tại A : R_0 giảm đến R_{min}
- Tại B: R_0 tăng đến R_{max}
- Tại C: R_{max} giảm đến R_0
- Tại D: R_{min} tăng đến R_0

Quá trình này liên tục diễn ra tạo nên các tín hiệu chu kỳ.

Ngày nay, trên cơ sở phát triển kỹ thuật vi xử lý người ta còn dùng một số phượng pháp chia nhỏ khoảng cách. Trong đó có phương pháp nhân xung và phương pháp nội suy điện tử dùng mạng điển trở thích hợp.

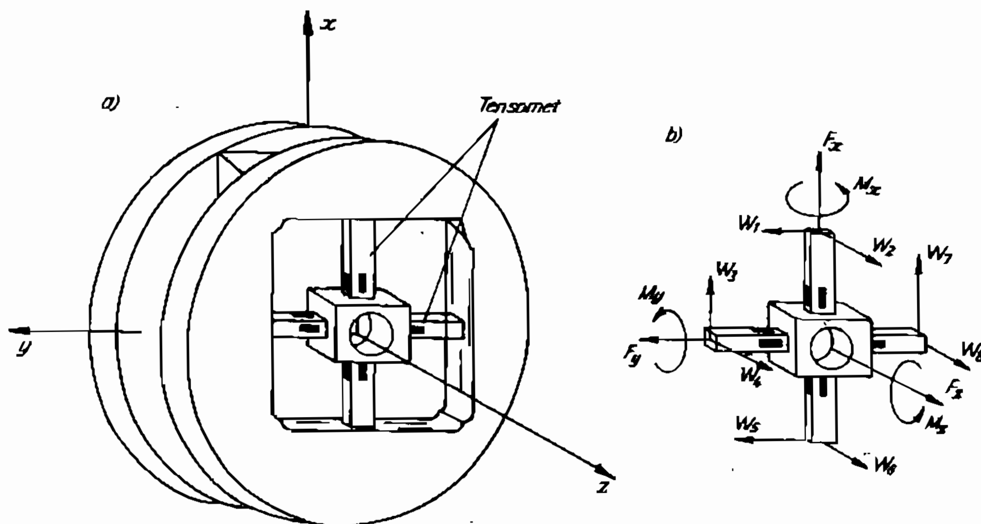
12.3. CẢM BIẾN LỰC VÀ CẢM BIẾN XÚC GIÁC

12.3.1. Cảm biến lực

Cảm biến lực chủ yếu dùng để nhận biết phản lực xuất hiện trong khi lắp ráp các chi tiết máy. Đôi khi cũng dùng để nhận tín hiệu lực trong các khớp động. Thường thường các cảm biến lực được lắp ở các khớp quay, khớp cổ tay hoặc trực tiếp trên bàn kẹp. Có nhiều phương pháp nhận biết lực dùng trong cơ cấu cảm biến. Ví dụ, trực tiếp suy ra từ sự biến thiên dòng điện ở động cơ một chiều lắp ở các khớp quay. Nhưng phổ biến là dùng phương pháp quen biết đo biến dạng dùng các tensomet. Chúng còn được gọi là các "tem biến dạng", vì trông giống như những con tem nhỏ chứa bên trong một dây điện trở và được dán trên các thanh biên dạng. Dưới đây giới thiệu một kiểu cảm biến lực thường được lắp ở khớp quay cổ tay, chỗ nối với bàn kẹp và gọi tắt là cảm biến lực chữ thập.

Cảm biến lực chữ thập.

Trên hình 12.9. mô tả một kiểu cảm biến lực khớp quay bàn kẹp, với bộ phận chủ yếu có hình chữ thập. Trên mỗi nhánh của hình chữ thập được dán 2 cặp tensomet. Qua những cầu đo, sẽ nhận biết được lực tác động lên mỗi nhánh chữ thập.



Hình 1 .9. *Cảm biến lực chữ thập*

Giả sử rằng ảnh hưởng qua lại giữa các tensomet là rất nhỏ, có thể bỏ qua. Như vậy từ các số đo của 8 cặp tensomet, bằng cách cộng hoặc trừ giữa chúng tuỳ theo các trường hợp cụ thể, có thể xác định được 3 thành phần lực F (F_x, F_y, F_z) và 3 thành phần mômem M (M_x, M_y, M_z). Gọi chung $\mathbf{F}_M$ là một vectơ mở rộng bao gồm 6 thành phần nói trên và **W** có thành phần là 8 số liệu đo được (W_1, W_2, W_3, W_4, W_5, W_6, W_7, W_8)

$$\mathbf{F}_M = R_F \mathbf{W} \qquad (12.5)$$

với:

$$R_F = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{18} \\ & \cdots & \\ r_{61} & & r_{68} \end{bmatrix} \qquad (12.6)$$

Các phần tử $r_{ij} \neq 0$ của ma trận R_F là các hệ số tương ứng để biến đổi các số đo theo đúng thứ nguyên của chúng: W (von), F(N), M(Nm).

Theo bố trí các tensomet như trên hình 12.9 thì một số phần tử r_{ij} sẽ bằng 0 và ma trận (12.6) sẽ như sau:

$$R_F = \begin{bmatrix} 0 & 0 & r_{31} & 0 & 0 & 0 & r_{17} & 0 \\ r_{21} & 0 & 0 & 0 & r_{25} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_{32} & 0 & r_{34} & 0 & r_{36} & 0 & r_{38} \\ 0 & 0 & 0 & r_{44} & 0 & 0 & 0 & r_{48} \\ 0 & r_{52} & 0 & 0 & 0 & r_{56} & 0 & 0 \\ r_{61} & 0 & r_{63} & 0 & r_{65} & 0 & r_{67} & 0 \end{bmatrix} \qquad (12.7)$$

Từ (12.5) và (12.7) có các thành phần của $\mathbf{F}_M$, ví dụ:

$$F_x = r_{13}W_3 + r_{17}W_7. \qquad (12.8)$$

Biểu thức (12.8) hoàn toàn phù hợp với hình 12.9b.

Để xác định các hệ số r_{ij} trong (12.7) người ta thường chuẩn mức hoá (calibration) kết hợp tính toán và thực nghiệm. Bản chất việc chuẩn hoá mức hoá ở đây là thiết lập một ma trận R_F^* thoả mãn điều kiện sau:

$$\mathbf{W} = R_F^* \mathbf{F}_M$$

(11.9)

R_F^* là ma trận 8x6.

Nhân 2 vế (12.9) với $(R_F^*)^T$, ta có:

$$(R_F^*)^T \mathbf{W} = [(R_F^*)^T R_F^*]^{-1} \mathbf{F}_M. \qquad (12.10)$$

Từ đó:

$$\mathbf{F}_M = [(R_F^*)^T R_F^*]^{-1} (R_F^*)^T \mathbf{W} \qquad (12.11)$$

So sánh (11.5) và (11.11), ta có:

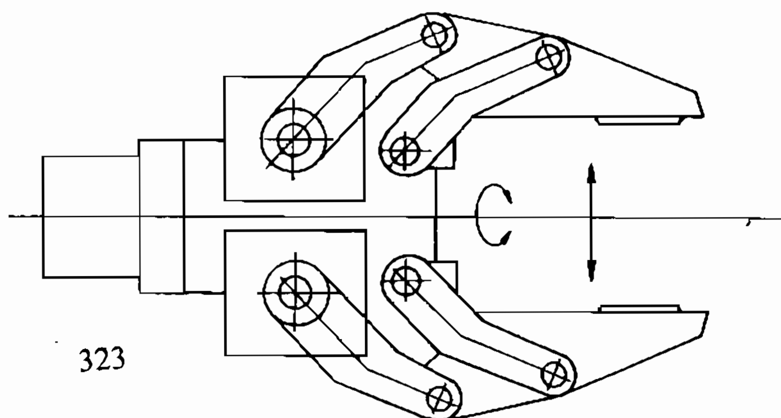
$$R_F \approx [(R_F^*)^T R_F^*]^{-1} (R_F^*)^T. \qquad (12.12)$$

Ma trận R_F^* được thiết lập trên cơ sở các công thức trên và các kết quả thực nghiệm khi cho trước các giá trị của $\mathbf{F}_M$.

12.3.2. Cảm biến xúc giác

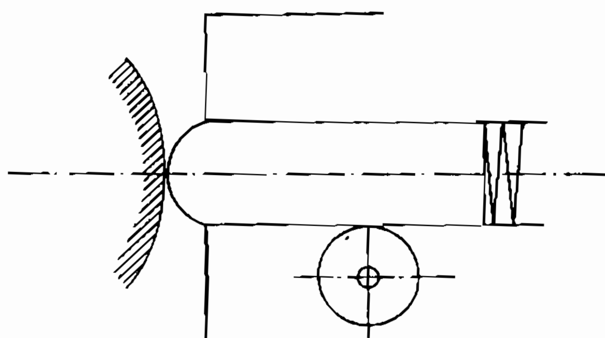
Trong kỹ thuật người máy thường dùng các cảm biến xúc giác để nhận thông tin về sự tiếp xúc của bàn kẹp với đối tượng. Những thông tin đó bao gồm vị trí, hình thù của đối tượng hoặc lực cần kẹp v.v.

Có thể phân cảm biến xúc giác ra hai nhóm cơ bản: cảm biến có ngưỡng tín hiệu rời rạc và cảm biến có tín hiệu tương tự. Cảm biến xúc giác có ngưỡng tín hiệu rời rạc. Đây thực chất là những công tắc tinh vi được lắp đặt ở phía bên trong của các ngón bàn kẹp (hình 12.10) để cho biết thông tin đã có vật kẹp giữa các ngón chưa, cần kẹp vào vị trí nào của vật v...v.



Hình 12.10. *Cảm biến xúc giác kiểu công tắc lắp bên trong bàn tay kẹp*

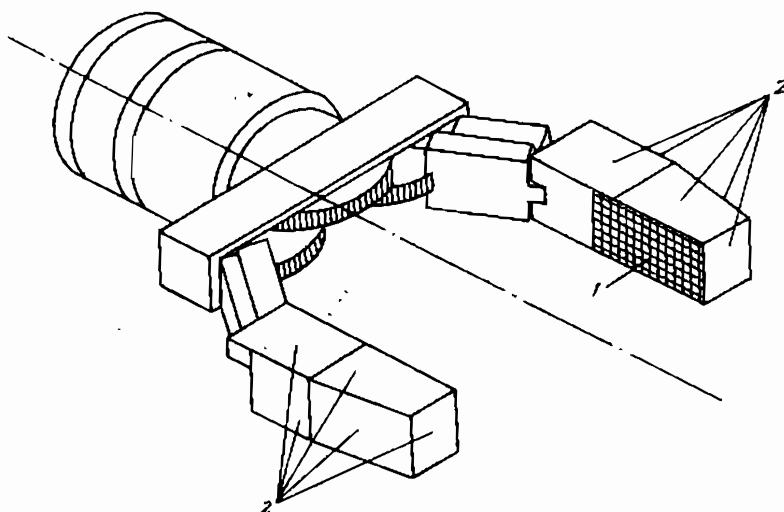
Các công tắc tinh vi có thể lắp đặt trên bề mặt tiếp xúc phía trong của bàn kẹp. Ngoài ra còn có thể lắp đặt ở phía ngoài bàn kẹp hoặc ở các đầu dò của cơ cấu tay máy để nhận biết thông tin về các chướng ngại vật trên đường di chuyển.



Hình 12.11. *Cảm biến xúc giác dùng tín hiệu tương tự*

Cảm biến xúc giác dùng tín hiệu tương tự loại đơn giản nhất có sơ đồ như trên hình 12.11. Nó gồm một thanh tỳ vào vật nhờ lực lò xo. Lực ngang từ phía vật tác dụng vào thanh làm chuyển động đi một góc quay (ví dụ, bằng cơ cấu thanh răng - bánh răng). Góc quay này tỷ lệ với lực ngang và được liên tục ghi đo bằng cơ cấu chiết áp. Ứng với độ cứng vững đã biết của lò xo, có thể xác định được lực theo độ dịch chuyển của góc để ghi đo.

Trong những năm gần đây một vấn đề rất được chú ý là tạo ra các bề mặt xúc giác có khả năng thu nhận cùng một lúc một lượng lớn thông tin. Trên hình 12.12 là một ví dụ minh hoạ. Phía bên trong các ngón của

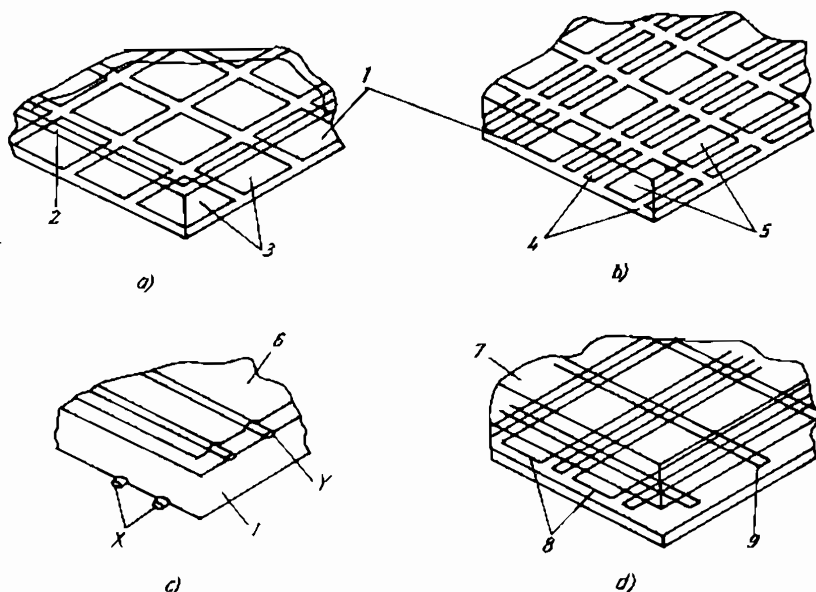


Hình 12.12. *Bản kẹp có trang bị bề mặt xúc giác*

bàn kẹp được gắn các mặt xúc giác (1). Các mặt phía bên ngoài (2) của bàn kẹp có thể gắn cả các cảm biến tín hiệu rời rạc.

Mặc dù mặt xúc giác thường là tổ hợp nhiều loại cảm biến riêng lẻ, nhưng một hướng có triển vọng là cùng dùng các tấm vật liệu bán dẫn, ví dụ, trên nền grafit có điện trở thay đổi theo áp lực. Sự thay đổi điện trở dễ dàng biến thành dao động tín hiệu điện. Biên độ của nó tỷ lệ với lực tác động lên bề mặt vật kẹp tại điểm tiếp xúc.Để tạo các mặt xúc giác mà đôi khi còn gọi là "lớp da nhân tạo" có thể có các phương pháp chủ yếu như trên hình 12.13.

Phương pháp ở hình 11.13a tạo ra các "cửa sổ" giữa khối vật liệu dẫn (1) nằm giữa thân vỏ (2) và hệ thống điện cực (3). Mỗi điện cực là một ô vuông "cửa sổ" tiếp nhận tín hiệu tại một điểm tiếp xúc với vật. Tuỳ thuộc vào áp lực lên vật liệu bán dẫn, dòng điện từ thân vỏ đến điện cực sẽ biến đổi. Theo phương pháp ở hình 12.13b có các cặp điện cực (4) trên các tấm mạch điện (5) thì vật liệu dẫn nằm phía trên và cách điện với tấm này trừ các chỗ tiếp xúc với điện cực. Áp lực từ đối tượng làm thay đổi điện trở và nhờ các mạch điện tử biến đổi thành các tín hiệu khác nhau.



Hình 12.13. *Phương pháp tạo các mặt xúc giác*

Trong các phương pháp hình 12.13c vật dẫn điện (1) đặt giữa 2 bộ điện cực ngang (X), dọc (Y) vuông gốc với nhau. Điểm chéo nhau giữa hai thanh điện cực X, Y có vật dẫn điện chen giữa thành một điểm nhạy

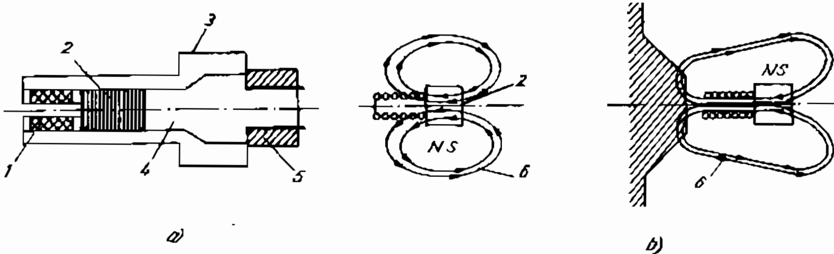
cảm. Bộ điện cực có lớp vỏ cao su (6) chuyển dịch tạo lực từ phía ngoài tác động lên mỗi điểm nhạy cảm làm thay đổi điện trở của vật dẫn và do vậy làm thay đổi dòng điện.

12.4. CẢM BIẾN TÍN HIỆU GẦN VÀ TÍN HIỆU XA.

12.4.1. Cảm biến tín hiệu gần.

Trong kỹ thuật người máy thường dùng các cảm biến tín hiệu gần để xác định sự có mặt của đối tượng trong phạm vi không gian ngay sát bên chỗ thao tác để kẹp vật hoặc di chuyển vòng qua chướng ngại, v.v... Thường sử dụng một số cảm biến chủ yếu sau đây:

Cảm biến từ cảm dựa trên nguyên tắc thay đổi độ từ cảm khi thay đổi cự ly giữa các vật thể kim loại và cảm biến.



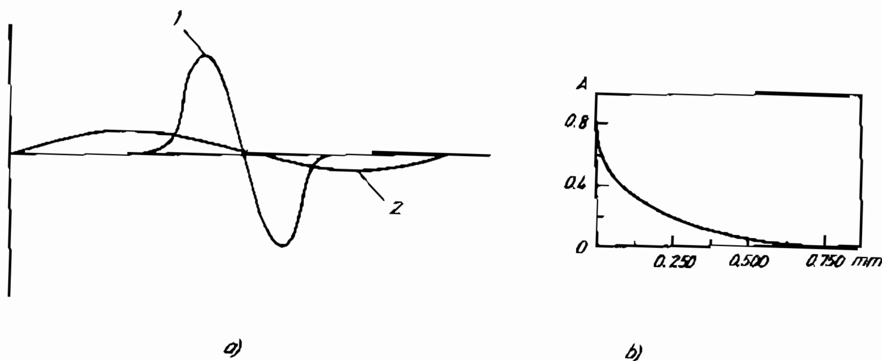
Hình 12.14. *Cảm biến từ cảm..*
a) Sơ đồ cấu tạo; b) Sơ đồ nguyên lý làm việc.,

Trên hình 12.14 là sơ đồ cấu tạo một kiểu cảm biến từ cảm. Nó gồm cuộn cảm (1) đặt sau nam châm vĩnh cửu (2) nằm trong thân vỏ (3) với phần cách điện (4) và đầu nối (5). Khi đặt cảm biến gần với vật thể nhiễm từ thì các đường sức (6) sẽ thay đổi và khi có chuyển động tương đối của chúng trong từ trường thì dòng điện cảm trong cuộn dây sẽ thay đổi cường độ, biên độ và tần số tỷ lệ với mức thay đổi từ trường.

Trên hình 12.15a. biểu diễn sự biến thiên theo thời gian t của điện thế V đầu ra cuộn cảm phụ thuộc vào vận tốc (1 - vận tốc cao, 2 - vận tốc thấp) dịch chuyển tương đối trong từ trường giữa cảm biến và đối tượng.

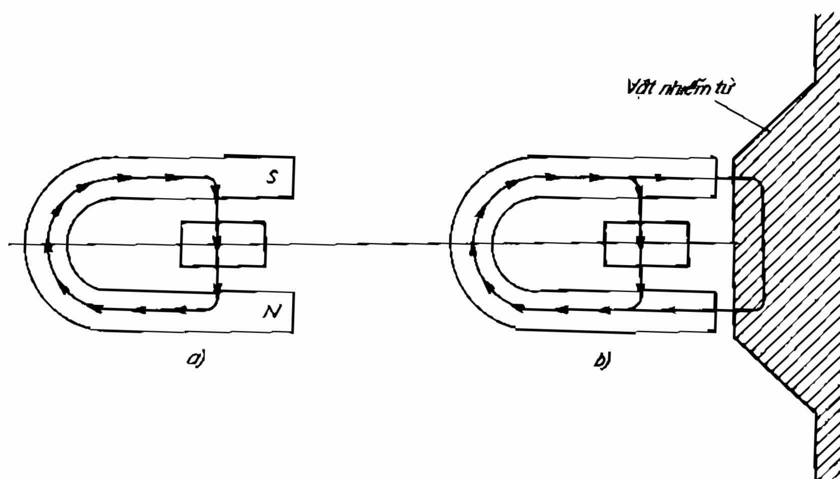
Trên hình 12.15b là quan hệ giữa biên độ A của điện thế và cự ly giữa cảm biến và đối tượng. Đồ thị cho thấy khoảng cách càng xa nhau thì độ nhạy càng giảm và cảm biến chỉ có hiệu lực trong cự ly dưới 1mm.

Như vậy, để nhận được tín hiệu ra từ cảm biến loại này cần có sự chuyển động tương đối giữa cảm biến và đối tượng. Thông thường trong kỹ thuật người máy khi dùng cảm biến tín hiệu gần chỉ cần tín hiệu ngưỡng không liên tục. Có thể nhận được tín hiệu loại này bằng cách tích phân tín hiệu ra.



Hình 12.15. *a) Quan hệ giữa điện thế V và thời gian, 1. vận tốc cao; 2. vận tốc thấp; b) Quan hệ giữa biên độ dòng điện và khoảng cách từ cảm biến đến đối tượng.*

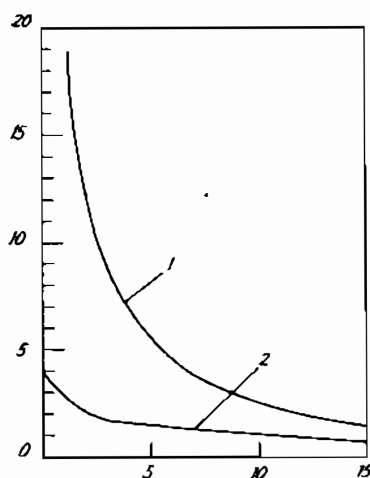
Cảm biến Hall dựa trên nguyên tắc của hiệu ứng Hall. Như trong vật lý đã biết hiệu ứng Hall liên hệ giữa điện thế hai đầu dây dẫn (hoặc bán dẫn) với từ trường. Nếu sử dụng cảm biến Hall này cùng với một nam châm vĩnh cửu, chúng sẽ nhận biết được sự có mặt của các vật thể nhiễm từ đặt sát bên cạnh. Như trên hình 12.16, khi có vật thể nhiễm từ sát bên cạnh thì từ lực (các mũi tên) chạy qua cảm biến Hall sẽ giảm đi rõ rệt. Nếu dùng chất bán dẫn, ví dụ, silic chẳng hạn, thì có thể giảm nhỏ đi kích cỡ của cảm biến, tăng độ chính xác, tăng độ ổn định và nhất là có thể cấy trực tiếp trên cảm biến một mạch khuyếch đại.



Hình 12.16. *a) Cảm biến Hall;*
b) Cảm biến Hall và vật nhiễm từ.

Cảm biến điện dung. Khác với các loại cảm biến từ cảm và cảm biến Hall là chỉ có thể nhận dạng các vật thể nhiễm từ, cảm biến điện dung phát hiện được tất cả các vật liệu rắn cũng như lỏng. Cảm biến này hoạt động theo nguyên tắc nhận biết các vật thể qua sự biến đổi của điện dung phụ thuộc vào khoảng cách tới vật đó. Có nhiều phương pháp nhận biết tín hiệu gần bằng các cảm biến điện dung. Đơn giản nhất là dùng bản tụ của cảm biến có thể rung khi điện dung vượt qua một giá trị ngưỡng nào đó. Dao động chuyển thành tín hiệu điện ở đầu ra. Cách phức tạp hơn là dùng phần tử điện dung luôn luôn có dao động hình sin. Khi điện dung thay đổi sẽ xuất hiện lệch pha. Độ lệch pha này tỷ lệ với điện dung cần nhận biết.

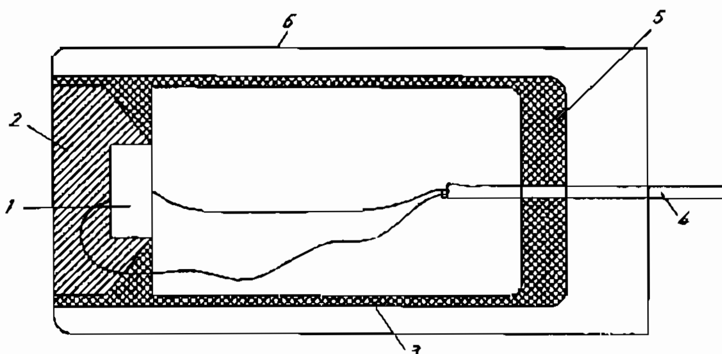
Hình 12.17 là đồ thị về sự thay đổi điện dung ΔC phụ thuộc vào khoảng cách tới vật tự do. Khi khoảng cách này vượt quá vài mm thì độ nhạy của cảm biến giảm đi rõ rệt. Độ nhạy đó còn phụ thuộc vào vật liệu đo như trên hình 12.17 (đường cong số 1 đối với thép, số 2 - đối với pôlyme).



Hình 12.17. *Quan hệ giữa điện dung và khoảng cách đến vật đo.*

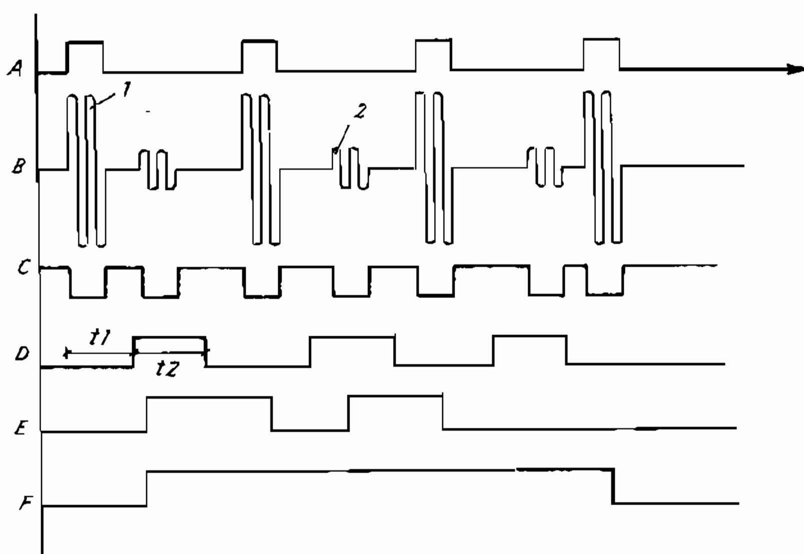
Cảm biến siêu âm. Các loại cảm biến giới thiệu ở trên đều phụ thuộc vào vật liệu của vật thể được đo. Mức độ phụ thuộc này có thể giảm đi nhiều khi dùng cảm biến siêu âm.

Trên hình 12.18 mô tả cấu tạo một loại cảm biến siêu âm dùng trong kỹ thuật người máy để nhận biết tín hiệu gần. Phần chủ yếu là bộ biến âm dùng chất gốm điện (1) được bảo vệ bằng chất nhựa tổng hợp (2). Tiếp theo là phần giảm âm (3), cáp điện (4), vỏ kim loại (5) và vỏ bọc (6).



Hình 12.18. *Cảm biến siêu âm.*

Để tìm hiểu hoạt động của cảm biến siêu âm, cần phân tích các tín hiệu khi nhận cũng như khi truyền âm lượng. Dạng điển hình của các tín hiệu này cho trên hình 12.19. A là tín hiệu mang, B là các tín hiệu phát ra (1) và tín hiệu phản lại (2). Các xung C tách biệt tín hiệu truyền và tín hiệu nhận. Để phân biệt sự khác nhau giữa các xung, tương ứng với tín hiệu mang và tín hiệu phản lại, tạo ra tín hiệu D. Δt là khoảng thời gian đo nhỏ nhất, còn $t_1 + t_2$ là khoảng đo lớn nhất. Các khoảng thời gian này tương ứng với khoảng truyền sóng trong môi trường khi nhận được tín hiệu phản lại (lúc đó tín hiệu D có giá trị lớn nhất) sẽ hình thành tín hiệu E và sẽ có giá trị bằng không khi kết thúc xung tín hiệu A. Cuối cùng tín hiệu F sẽ hình thành khi xuất hiện xung tín hiệu E và sẽ là tín hiệu ra của cảm biến siêu âm hoạt động theo chế độ nhị phân.



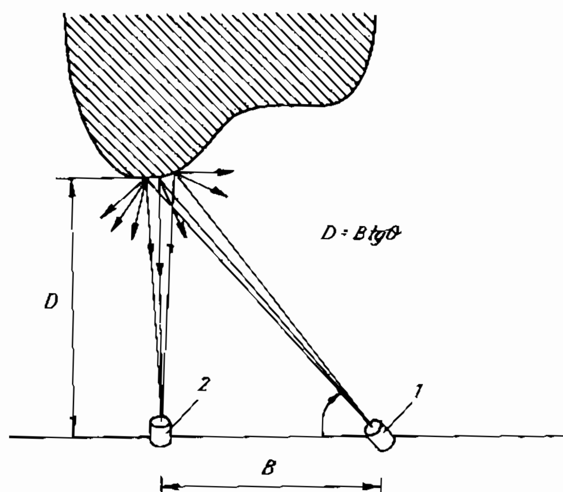
Hình 12.19. *Tín hiệu siêu âm*

11.4.2. Cảm biến tín hiệu xa.

Trong kỹ thuật người máy thường trang bị các cảm biến tín hiệu xa để xác định khoảng cách từ chỗ lắp đặt cảm biến đến đối tượng. Khoảng cách có thể đo được theo thời gian phát đi và nhận lại tín hiệu xa dùng để dẫn đường cho người máy, giúp nó xác định các vị trí, hình thể của đối tượng và tìm cách vòng qua chướng ngại. Dưới đây giới thiệu một vài phương pháp nhận tín hiệu xa.

- Đo tam giác là phương pháp đơn giản đo tín hiệu xa (hình 12.20). Đối tượng được chiếu sáng bằng một chùm tia của nguồn sáng (1), chùm tia này tác động vào bề mặt đối tượng và phản xạ vào đầu thu

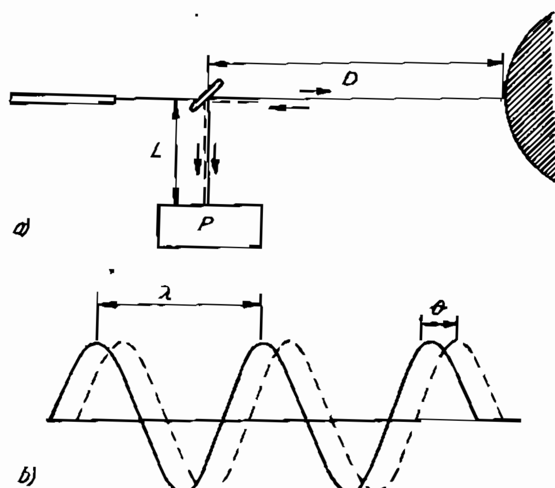
(2). Như vậy có thể xác định khoảng cách D từ quan hệ kích thước của tam giác đo, hình 12.20.



Hình 12.20. *Phương pháp đo tam giác*

- Đo khoảng cách theo thời gian truyền tín hiệu.

+ Cách thứ nhất là xung ánh sáng chiếu tới và phản lại cùng dọc theo một đường. Khi đó khoảng cách tới bề mặt đối tượng được tính theo công thức D - c. T/2, với T - thời gian truyền tín hiệu, c - tốc độ ánh sáng. Hệ thống dùng xung lade có thể thu được đồng thời tín hiệu hai chiều tỷ lệ với khoảng cách, nên tạo ra ảnh của đối tượng.



Hình 12.21. *Đo khoảng cách theo thời gian truyền tín hiệu.*

+ Cách thứ hai là dùng tín hiệu tia lade.

Trong cách thứ hai thay tín hiệu xung ánh sáng bằng tia lade liên tục và khoảng cách được tính toán qua độ lệch pha giữa tia tới và tia phản hồi (hình 12.21a).

Giả thiết các tia lade với bước sóng λ được tách hàng hai: một tia hướng về thiết bị đo pha (P) đặt cách khoảng L, còn tia kia chiếu vào bề mặt đối tượng đặt cách khoảng D. Như vậy quãng đường tổng cộng chiếu tới và phản hồi từ bề mặt đối tượng D' = L + 2D. Nếu D = 0 thì D' = L và lúc đó hai tia tới thiết bị đo pha cùng một lúc. Hai tia này sẽ càng lệch pha nhau (hình 11.21b) nếu D càng tăng lên. Trong trường hợp này ta có:

$$D' = L\frac{\theta}{360}\lambda$$

với θ - độ lệch pha.

Để tách biệt được hai tia, tức là để hai sóng không trùng nhau thì $\theta < 360^0$ hoặc $2D < \lambda$.

Từ hai biểu thức đối với D' suy ra:

$$D = \frac{\theta}{360}\frac{\lambda}{2} \qquad \text{(12.13)}$$

Vậy có thể xác định khoảng cách qua độ lệch pha (θ) nếu đã biết bước sóng (λ).

+ Một phương pháp điển hình khác để đo khoảng cách theo thời gian truyền tín hiệu là phương pháp siêu âm. Ý tưởng cơ bản của phương pháp này cũng tương tự như trong phương pháp dùng tín hiệu xung lade.

Tín hiệu siêu âm được truyền đi trong một khoảng thời gian ngắn và vận tốc truyền âm trong môi trường coi như đã biết. Qua việc tính toán quãng thời gian giữa tín hiệu truyền tới và tín hiệu phản hồi sẽ đánh giá được khoảng cách đến bề mặt đối tượng đo./.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Andre P., Kauffmann J. M., Lhote F., Taillard J. M.
   Les Robot- Constituants Technologiques.
   Hermes Publishing, 1983.
2. Cayer M.
   Vocabulaire de la robotique-Classification et Syteme mecanique.
   Les Publications du Québec. 1993.
3. Coiffet P., Les robots.
   T.2. Interaction avec l' Environnement.
   Hermes Publishing, 1981
4. Computational Kinematics.
   Kluwer Academic Publishers, 1993.
5. Denavit J., Hartenberg R. S.,
   A Kinematic Notation for Lower-Pair Mechanisms Based on Matrises.
   ASME Journal of Applied Mechanics, 1955
6. Etter D. M.,
   Engineering Problem Solving with Matlab,
   Prentice - Hall, 1993
7. Fu. K. S., Gonzater R.C., Lee C.S.G.
   Robotics: Control, Sensing, Vision and Intelligence.
   McGraw-Hill, 1987
8. Jutard A., Betemps M.,
   Les robots.
   Editions Hermes, 1988.
9. Mair G.
   Industrial Robotics.
   Prentice Hall, 1988
10. Murray R., Li Z., Sastry S.,
    A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation.
    CRC Press, 1989

11. Paul R. P.,

Modeling, Trajectory Caculation and Servoing of a Computer Controlled Arm.

Palo Alto Calif, 1972.

12. Paul R. P.,

Robot Manipulators: Mathematics, Programming and Control.

The MIT Press - Cambridge, Massachusetts and London, England, 1981.

13. Proceedings of the 7th Int. Symposium on Industrial Robots.

Japan, Tokyo, 1977.

14. Proceeding of the 5th Word Congress of Theory of Machines and Mechanisms.

Canada, Montreal, 1979.

15. Proceedings of the 10th International Symosium on Industrial Robots. Italy, Milan, 1980.

16. Proceedings of National Workshop "Robotics".

New Delhi, April, 1987

17. Proceedings of the 9th World Congress on the Theory of Machines and Mechanisms.

Milano, Italy, 1995

18. Proceedings of the 10th World Congress on the Theory of Machines and Mechanisms.

Oulu, Finland, 1999.

19. Rohrs C.E., Melsa J.L., Schultz D. G.,

Linear Control Systems

McGraw - Hill, 1993

20. Roth B.,

Robotics, Applied Mechanics Reviews, Vol. 31, 1978

21. Waldron K. J., Kincel G. L.,

The relation between actuator geometry and mechanical effcienncy in robots. Preprints 4th CISM - IFToMM Symposium on Theory and Pract. of Manipul.

Warsawa, 1981.

22. Schilling R. J.,

Fundamentals of Robotics, Analysis & Control.

Prentice Hall, 1990

23. Snyder W. E.,

Industrial Robots: Computer Interfacing and Control.

Prentice Hall Inc. New Jersey, 1985.

24. Stadler W.,

Analytical Robotics and Mechatronics.

McGraw-Hill, 1995

25. Stoll K., Deppert W.,

Pneumatic Control.

Vogel Buchverlag Wurzburg, 1987.

26. Stone H.W.,

Kinematic Modeling Identification, and Control of Robotic Manipulators.

Kluwer Academic publishers, 1987.

27. Shimon Y.Nof,

Handbook of Industrial Robotics, 2nd ed,

John Wiley & Sons. Inc. 1999.

28. Theory and Practice of Robots and Manipulators, Proceedings of RoManSy '84. The 5th CISM-IFToMM Symposium.

Kogan Page, 1985.

29. Young J. E.,

Robotics,

London, 1980.

30. Nguyễn Thiện Phúc,

Tay máy - Người máy công nghiệp.

Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật, 1983.

31. Nguyễn Thiện Phúc, Trương Sĩ Vinh,

Tự động hoá thiết kế các sơ đồ môđun truyền dẫn khí nén.

Tạp chí Cơ học, số 1, 1991.

32. Nguyễn Thiện Phúc.

Người máy công nghiệp và sản xuất linh hoạt.

Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật. 1991.

33. Nguyễn Thiện Phúc, Trần Văn Cường.

Tay máy công nghiệp TM-3B.

Thông báo khoa học của các trường Đại học, 1995.

34. Nguyễn Thiện Phúc,

Người máy phỏng sinh và mô hình động học dạng tổng quát.

Tạp chí Cơ học, số 4, 1995.

35. Nguyễn Thiện Phúc, Trần Văn Cường,

Về một phương pháp giải bài toán ngược động học khi tổng hợp quỹ đạo chuyển động của người máy.

Tuyển tập các báo cáo khoa học Hội nghị Tự động hoá toàn quốc lần thứ II, 1996.

36. Nguyễn Thiện Phúc,

Điều khiển chuyển động robot hàn theo quỹ đạo định trước.

Tuyển tập công trình Hội nghị Cơ học toàn quốc lần thứ VI. Hà nội, 12/1997.

37. Nguyễn Thiện Phúc,

On the problem of controlling robot motions along a presribed trajectory.

Preprints of the RESCCE '98.

38. Nguyễn Thiện Phúc,

Phát triển phương pháp "các nhóm 3" để giải bài toán ngược động học khi tổng hợp quỹ đạo chuyển động của tay máy - người máy.

Tuyển tập các báo cáo khoa học Hội nghị Cơ học máy Việt Nam, Hà Nội, 1999.

39. Nguyễn Thiện Phúc, Phạm Phú Lý, Phạm Đăng Phước, Automatic Establishment of Kinematic, Modelling and Simulation of Robots. Proceedings of VJ'ASEM, 2000.

40. Nguyễn Thiện Phúc, Nguyễn Văn Minh, Trần Ngọc Toản, Phạm Đăng Phước,

Nghiên cứu thiết kế, chế tạo robot sơn phủ RSP - 406.

Tuyển tập báo cáo khoa học Hội nghị Tự động hoá toàn quốc lần thứ IV, 4/2000.

41. Nguyễn Thiện Phúc,

Kết quả nghiên cứu về robot công nghiệp tại Trung tâm nghiên cứu kỹ thuật tự động hoá, trường Đại học Bách khoa - Hà Nội.

Tạp chí Tự động hoá ngày nay, số 15- 10/ 2001.

42. Nguyễn Thiện Phúc, Trần Ngọc Toản, Trần Minh Nghĩa, Nguyễn Tiến Đức,

Nghiên cứu thiết kế chế tạo robot SCA mini.

Tuyển tập công trình khoa học Hội nghị khoa học toàn quốc về cơ kỹ thuật, Tập 2, 10/2001

43. Phạm Đăng Phước

Robot công nghiệp,

Trường Đại học Kỹ thuật Đà Nẵng, 1998.

44. Артоболевский И. И.

Теория механизмов и машин.

М. Наука, 1975.

45. Балакшин Б. С., Базров Б. М., Митрофанов В. Г. и Др.

Адаптивное управление стаками.

М. Мащиностронение, 1973

46. Белянин П. Н.

Промыьшленные роботы и их примение.

М. Машиностроение, 1983.

47. Кобринский А. А., Кобринский А. Е.

Манипуляционные системы роботов.

М. Наука, 1985.

48. Козырев Ю. Г., Шифрин Я. А.,
Современые промышленые роботы: Каталог.
М. Машиностроение, 1984.
49. Коловский М. З., Слоущ А. В.,
Основы динамики промышленных роботов.
М. Наука. Гл. ред. физ. мат. лит., 1988.
50. Колчин Н. И.,
Механика машин: в 2-томах.Т.2.
Л.: Машгиз, 1962
51. Колчин Н.И., Нгуен Тхен Фук.
Об образовании новых винтовых поверхностей применительно к зубчатым перегачам. Труды ЛПИ, 321.
Маш., 1972.
52. Корендясев А. И., Саламандра Б. Л., Тывес Л. И.
Определение числа степеней свободы исполнительного органа промышлелного робота.
Машиноведение. 1985, *No. 6.*
53. Дилов Л., Парушев П., Бекяров Б.
Анализ точности манипуляционных систем.
"Теоретична и приложна механика",
Б А Н, *No.* 4, 1981.
54. Литвин Ф. Л.
Теория зубчатых зацеплений.
М. Наука, 1968.
55. Медведев В. С., Лесков А. Г., Ющенко А. С.
Системы управление манипуляционных роботов.
М. Наука, 1979.

56. Минков К.

Някои проблеми на механиката на манипулиращи роботи, Докл. Ю Н С 84, ВТУ "Ангел Кънчев". Русе, 1984.

57. Механика промышленных роботов: Учеб. Пособие для втузов: В 3 кн./Под. Ред. К. В. Фролова, Е. И. Воробьева/

Высшая. Школа., 1989.

58. Нахапетян Е. Г.

Квалиметрия и диагностирование роботов // Экспериментальные исследования и диагностирование роботов.

М. Наука, 1981.

59. Никифоров С. О., Смольников Б. А.

Оптимизация параметров трехзвенного манипулятора // Робототехника.

Л.: ЛПИ, 1976.

60. Охоцимский Д. Е., Голубев Ю. Ф.

Механика и управление движением автоматическово шагающего аппарата.

М.: Наука, 1984.

61. Фролов К. В.

Методы совршенствования машин и современные проблемы машиноведения.

М. Машиностроение, 1984.

62. Черноусько Ф. Л., Болотник Н. Н., Градецкий В. Г.

Манипуляционные роботы: динамика, управление, оптимизация.

М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989.

63. Юревич Е. И., Аветиков Б. Г., Корыко О. Б.,

Андриапов Ю. Д., Королев В. А., Савин В. Г.

Устройство промышленных роботов.

MỤC LỤC

Trang

Trang

ROBOT CÔNG NGHIỆP

Tác giả: GS. TSKH. NGUYỄN THIỆN PHÚC

Chịu trách nhiệm xuất bản: PGS.TS. TÔ ĐĂNG HẢI
Biên tập và sửa chế bản: NGUYỄN THỊ DIỆU THUÝ
Trình bày và làm chế bản: NGUYỄN HÒA BÌNH
Vẽ hình: NGUYỄN THỊ HẠNH
Vẽ bìa: HƯƠNG LAN

NHÀ XUẤT BẢN KHOA HỌC VÀ KỸ THUẬT
70 Trần Hưng Đạo, Hà Nội

In 1.000 cuốn, khổ 16 x 24 cm tại Xưởng in Nhà xuất bản Thống kê. Giấy phép xuất bản số: 136-2006/CXB/331-06/KHKT. In xong và nộp lưu chiểu quý II năm 2006.

206159



Giá: 48.000đ